ОТРАСЛЕВОЙ СТАНДАРТ

УСТРОЙСТВА СВЧ. ПОЛОСКОВЫЕ ЛИНИИ. ЭЛЕМЕНТЫ И УЗЛЫ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ

ОСТ4.070.000

Редакция 1 — 75

Издание официальное

1976

УДК 621.372.89.001.1 (083.75) Проверен в 1979 г. (1) Группа Э57

ОТРАСЛЕВОЙ СТАНДАРТ

УСТРОЙСТВА СВЧ. ПОЛОСКОВЫЕ ЛИНИИ. ЭЛЕМЕНТЫ И УЗЛЫ

Проектирование

ОСТ4.070.000
Редакция 1—75
Взамен
РТМ ЮгО.010.002

Директивным письмом организации от 18 декабря 1975 г. № 17—42/6/274 срок действия установлен с 1 января 1977 г.

Настоящий стандарт распространяется на полосковые элементы и узлы. Стандарт устанавливает их проектирование и методы расчета в дециметровом диапазоне длин волн.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОЛОСКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ

1.1. При проектировании полосковых элементов и узлов исходными данными являются:

— электрические параметры в заданных частотных диапазонах;
— габаритные размеры;
— масса;
— стоимость;
— устойчивость к различным воздействиям (климатическим, механическим и т. д.).

1.2. Основными этапами проектирования полосковых элементов и узлов являются:

I — выбор типа и основания линии;
II — выбор вида элементов или узлов в соответствующем классе;
III — расчет полосковых элементов и узлов;
IV — конструирование.

1.3. Выбор типа и основания линии следует проводить на основе исходных данных.

1.4. Существуют четыре основных типа полосковых линий:

— симметричные;
— несимметричные;
— щелевые;
— копланарные.

1.5. К преимуществам полосковых линий относятся:

— большая широкополосность по сравнению с волноводами;
— повышенная способность элементов и узлов к интеграции схем СВЧ диапазона;
— достаточно малые потери (особенно в случае симметричной полосковой линии, когда потери приблизительно равны потерям в коаксиальной линии);
— простота изготовления;
— малые масса и объем;
— низкая стоимость изготовления;
— возможность легкой замены в узлах на несимметричных линиях навесных элементов;
— технологичность.

1.6. К недостаткам полосковых линий относятся:

— более низкая пробивная мощность, чем у прямоугольных волноводов:
— жесткость допусков на поперечные размеры и толщину полоски, разнотолщинность диэлектрического основания и неоднородность диэлектрика по диэлектрической проницаемости ε.

1.7. Основными недостатками несимметричных полосковых линий, по сравнению с симметричными, являются:

— возможность возникновения, кроме поперечных резонансов, спектра поверхностных волн, низшие из которых имеют нулевую критическую частоту;
— необходимость экранировки несимметричной полосковой линии.

1.8. Щелевые и копланарные — новые типы полосковых линий передачи СВЧ. Особенностями этих типов линий являются:

— отсутствие нижней критической частоты;
— наличие эллиптически поляризованного магнитного поля, что позволяет конструировать миниатюрные невзаимные ферритовые устройства.

1.9. При выборе СВЧ-диэлектриков для основания полосковой платы следует руководствоваться:

— возможностью реализации на выбранном СВЧ-диэлектрике требуемых электрических параметров;
— наличием у СВЧ-диэлектрика необходимых физико-механических качеств;
— величиной диэлектрической проницаемости ε для удовлетворения требований по габаритным размерам;
— характером выпуска СВЧ-диэлектрика (серийный выпуск, выпуск по заказам и т. п.);
— технологическими особенностями СВЧ-диэлектрика в ходе процесса изготовления полоскового устройства.

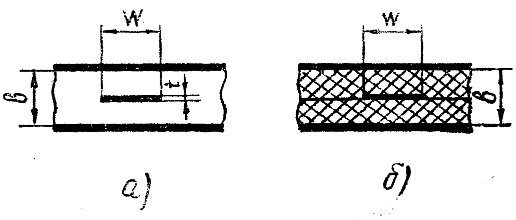
Выбор конкретных диэлектрических СВЧ-материалов производить по ОСТ4 ГО.710.001.

1.10. Выбор вида элемента и узла в соответствующем классе элементов и узлов (например, шлейфный ответвитель или ответвитель с распределенной связью) производить на основе исходных общих и технических требований и результатов I этапа проектирования с использованием необходимых методик расчета.

1.11. Расчет полосковых элементов и узлов следует производить на основе исходных технических требований и результатов I и II этапов проектирования по методам и формулам, приведенным в разделах 2—11.

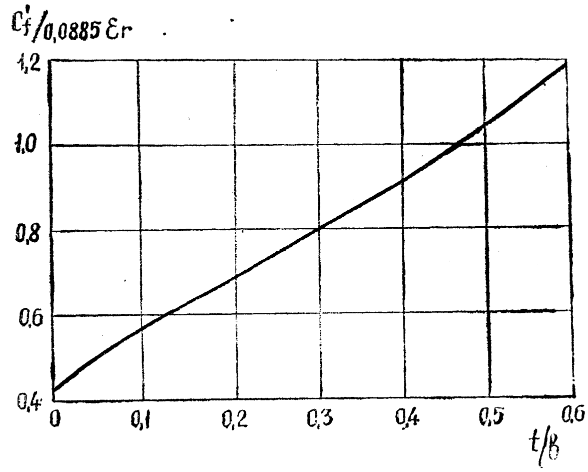
1.12. Конструирование полосковых элементов и узлов следует производить на основе исходных общих технических требований, а также результатов I—III этапов проектирования в соответствии с ОСТ4 ГО.710.001 и ОСТ4 ГО.010.018.

Сечение симметричной полосковой линии



Черт. 1.

График величин краевой емкости



Черт. 2

2. ПОЛОСКОВЫЕ ЛИНИИ

2.1. Симметричные полосковые линии

2.1.1. Поперечное сечение симметричной полосковой линии приведено на черт. 1.

2.1.2. Формулы для расчета волнового сопротивления симметричных полосковых линий приведены в табл. 1.

2.1.3. График величин краевой емкости C'_f приведен на черт. 2.

Таблица 1

Расчет волнового сопротивления симметричной полосковой линии, Z_0, *Ом*	Условия применимости
$$Z_0=\frac{94{,}15}{\sqrt{\varepsilon_r}\left(\frac{\frac{W}{b}}{1-\frac{t}{b}}+\frac{C'_f}{0{,}0885\varepsilon_r}\right)}, \qquad (1)$$ где C^1_f — краевая емкость между одним краем полоски и соседней заземленной плоскостью $$C^1_f=\frac{0{,}0885\varepsilon_r}{\pi}\left[\frac{2}{1-\frac{t}{b}}\ln\left(\frac{1}{1-\frac{t}{b}}+1\right)-\left(\frac{1}{1-\frac{t}{b}}-1\right)\ln\left(\frac{1}{1-\frac{t}{b^2}}-1\right)\right] \text{пф/см}; \qquad (2)$$	$W \geqslant 0{,}35(b-t)$ Формула для краевой емкости C'_f является точной (получена методом конформных отображений)
$$Z_0=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\cdot\frac{200}{1+\frac{2w}{b-t}}\left(1-\frac{2t}{b-t}\right); \qquad (3)$$	$W < b-t$
$$Z_0=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\cdot\frac{200}{1+\frac{2w}{b-3t}}; \qquad (4)$$	$W > b-t$

Продолжение табл. 1

Расчет волнового сопротивления симметричной полосковой линии, Z_0, *Ом*		Условия применимости	
$$Z_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \frac{94\left(1-\frac{t}{b}\right)}{\frac{w}{b}+0{,}47+0{,}65\frac{t}{b}-1{,}12\left(\frac{t}{b}\right)^2};$$	(5)	$W \geqslant 0{,}35(b-t)$ $nt \leqslant 0{,}5b$	Формулы справедливы, когда ширина заземленных пластин превышает в 5—6 раз ширину центральной полоски
$$Z_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} 138 \lg \frac{\frac{8}{\pi}}{\left(\frac{w}{b}+1{,}4\frac{t}{b}\right)},$$	(6)	$W \leqslant 0{,}35(b-t) nt \leqslant 0{,}25b$	
где ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей линию			

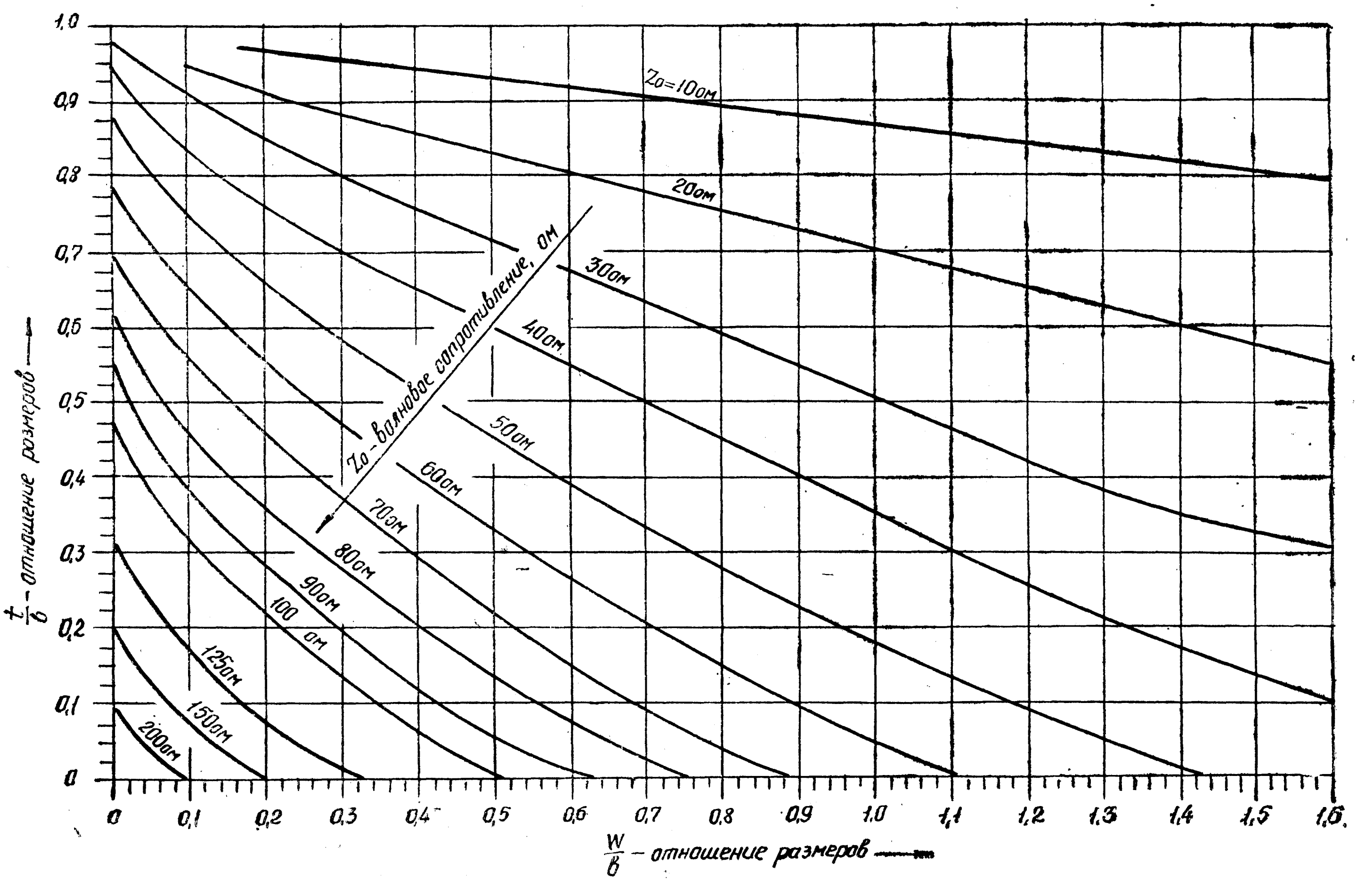
2.1.4. График зависимости волнового сопротивления Z_0 от $\frac{W}{b}$ для различных $\frac{t}{b}$ приведен на черт. 3 и 4 (для линий с воздушным диэлектриком).

2.1.5. Потери в полосковой линии α определяются тремя факторами:

$$\alpha = \alpha_п + \alpha_д + \alpha_и, \quad (7)$$

где $\alpha_п$ — потери в проводниках;
$\alpha_д$ — потери в диэлектрике;
$\alpha_и$ — потери на излучение (пренебрежимо малы).

Сопротивление волновое симметричной полосковой линии в функции $\frac{W}{b}$



Черт. 3

Потери в диэлектрике следует определять по формуле

$$\alpha_{д}=\frac{27,3\sqrt{\varepsilon_r}\,\mathrm{tg}\delta}{\lambda}\,\partial Б/м, \tag{8}$$

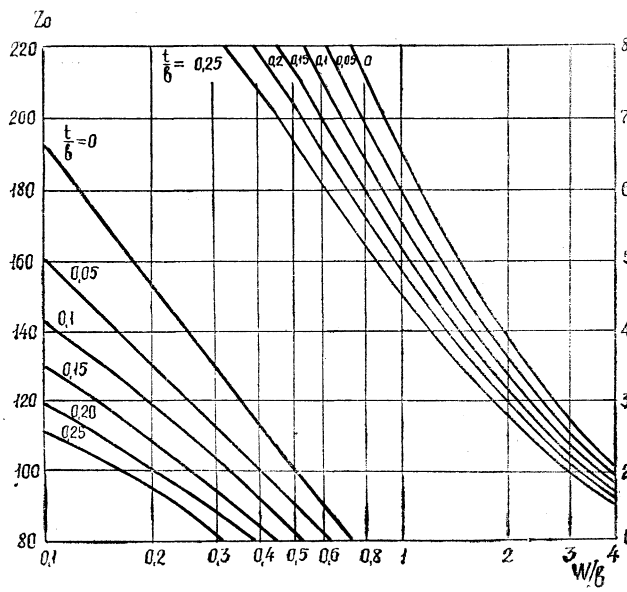
где λ — длина волны в свободном пространстве, *м;*
ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей линию;
$\mathrm{tg}\delta$ — тангенс угла потерь среды, заполняющей линию.

Потери в проводниках в случае широкого внутреннего проводника $\frac{w}{b-t}\geqslant 0,35$ определять по формуле

$$\alpha_{п}=\frac{0,244R_s\varepsilon_r z_0}{b}\left\{\frac{1}{1-\frac{t}{b}}+\frac{2\frac{w}{b}}{\left(1-\frac{t}{b}\right)}+\frac{1}{\pi}\frac{\left(1+\frac{t}{b}\right)}{\left(1-\frac{t}{b}\right)^2}\ln\left(\frac{2b}{t}-1\right)\right\}\partial Б/м \tag{9}$$

где R_s — поверхностное сопротивление, *Ом;*
b — расстояние между пластинами, *мм.*

Сопротивление волновое симметричной полосковой линии в функции w/b



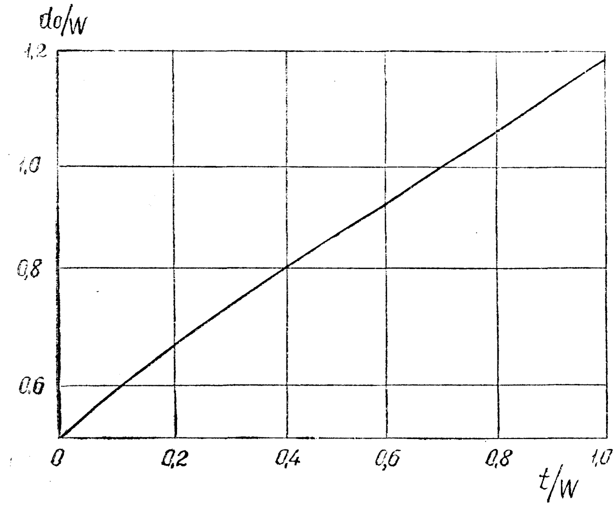
Черт. 4

Для случая узких внутренних проводников $\frac{w}{b-t}\leqslant 0,35$ и $\frac{t}{b}\leqslant 0,25$ потери определять по формуле

$$\alpha_{п}=\frac{1,38\cdot 10^3 R_s}{z_0\cdot b}\left\{1+\frac{b}{d_0}\left[\frac{1}{2}+0,669\frac{t}{w}-0,255\left(\frac{t}{w}\right)^2+\frac{1}{2\pi}\ln\frac{4\pi w}{t}\right]\right\}\ \partial Б/м, \tag{10}$$

где d_0 — эквивалентный диаметр, определяемый по графику, приведенному на черт. 5.

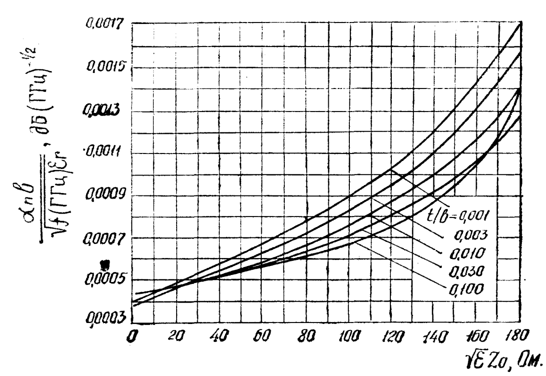
График для определения эквивалентного диаметра d_0



Черт. 5

На черт. 6 приведены графики потерь в симметричной полосковой линии с медными проводниками.

График потерь в симметричной полосковой линии с медными проводниками



Черт. 6

2.1.6. Максимальные поперечные размеры симметричной полосковой линии следует определять из условия невозможности распространения волн высших типов.

Критическую частоту волны наинизшего типа H определять по формуле

$$f_{кр.H} = \frac{30}{\sqrt{\varepsilon_r}[2w + \pi b/2]} \, ГГц, \qquad (11)$$

где W — ширина полоскового проводника, *см*;
b — высота симметричной полосковой линии, *см*.

Критическую длину волны наинизшего типа E определять по формуле

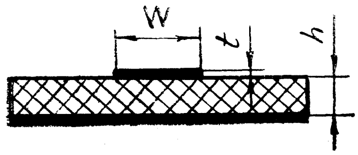
$$f_{кр.E} = \frac{30}{\sqrt{\varepsilon_r} b} \, ГГц, \qquad (12)$$

где b — высота симметричной полосковой линии, *см*.

2.2. Несимметричные полосковые линии

2.2.1. Поперечное сечение несимметричной полосковой линии приведено на черт. 7.

Сечение несимметричной полосковой линии



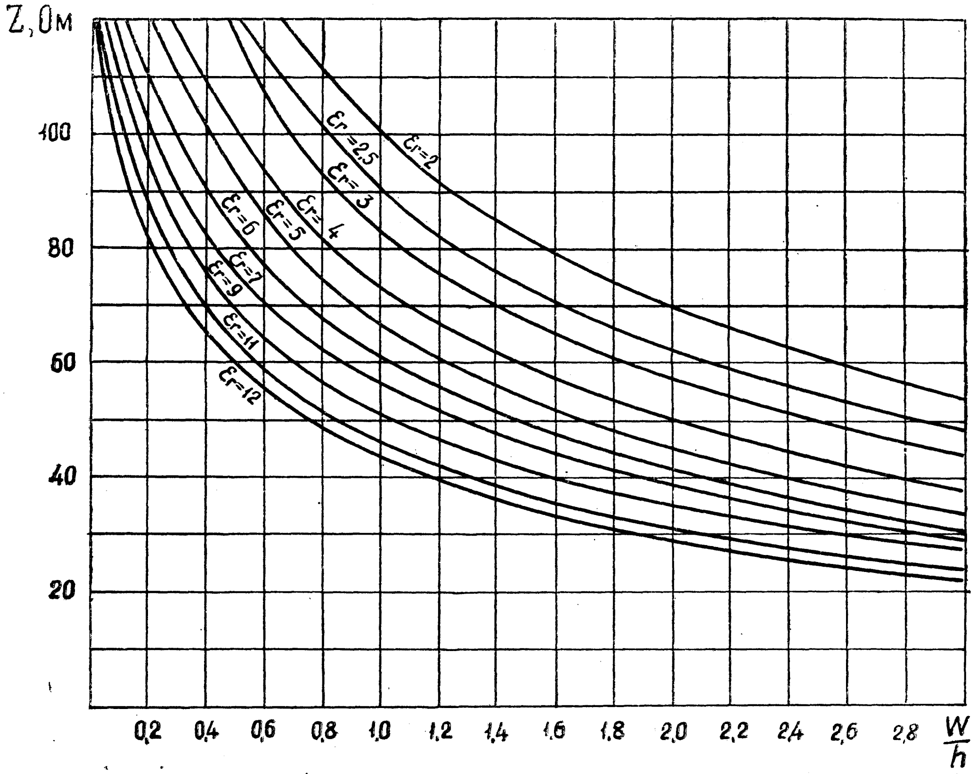
Черт. 7

2.2.2. Формулы для расчета волнового сопротивления несимметричной полосковой линии приведены в табл. 2.

Зависимость волнового сопротивления несимметричной полосковой линии от параметра $\frac{W}{h}$ для различных ε_r приведена на черт. 8.

2.2.3. Формулы для расчета потерь несимметричной полосковой линии приведены в табл. 3.

График зависимости волнового сопротивления несимметричной полосковой линии от $\frac{W}{h}$ для различных ε_r



Черт. 8

Таблица 2

Расчет волнового сопротивления несимметричной полосковой линии, Z_0, *Ом*		Условия применимости
$$Z_0=\frac{\frac{376{,}7}{\sqrt{\varepsilon_{эфф}}}}{\frac{w}{h}+2{,}42-0{,}44\frac{h}{w}+\left(1-\frac{h}{w}\right)^6};$$	(13)	$\frac{W}{h}\geqslant 1$ При $0<\frac{W}{h}<10$ погрешность не более $\pm 0{,}25\%$
$$Z_0=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{эфф}}}60\ln\left(\frac{8h}{w}+\frac{w}{4h}\right);$$	(14)	$\frac{W}{h}\leqslant 1$ При $\frac{W}{h}>10$ погрешность не более $\pm 1\%$
$$Z_0=\frac{377h}{\sqrt{\varepsilon_r}W\left[1+1{,}735\varepsilon_r^{-0{,}0724}\left(\frac{w}{h}\right)^{-0{,}836}\right]};$$	(15)	W заменить на $W_{эфф}$ погрешность при $t\neq 0$, не более 1%, где $W_{эфф}=W+\frac{t}{\pi}\left(\ln\frac{2h}{t}+1\right)$
$$Z_0=\frac{272{,}8\lg\left\{1+\frac{2\pi}{w/h}\left[1+0{,}27\,th^2\left(\frac{1{,}4h}{w}\right)\right]\right\}}{\sqrt{\varepsilon_r}\,th\left(\lg\frac{w}{6h}\right)+3\varepsilon_r\left(1+\frac{\varepsilon_r}{80}\right)};$$	(16)	$0{,}01<\frac{W}{h}<7$ погрешность не более 2%
$$Z_0=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\frac{300}{\left(1+\frac{w}{h}\right)};$$	(17)	$0{,}05<t<0{,}3$ *мм*
$$Z_0=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\frac{100\pi}{1+\frac{w}{h}}\left(1-\frac{t}{h}\right);$$	(18)	$\frac{W}{h}<2$
$$Z_0=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\frac{100\pi}{1+\frac{w}{h}\left(\frac{1}{1-\frac{t}{h}}\right)^{-1}}.$$	(19)	$\frac{W}{h}>2$

Примечание. Формулы для Z_0 и $\varepsilon_{эфф}$ не учитывают дисперсию.

Таблица 3

Расчет потерь α		Условия применимости
Общие потери $\alpha=\alpha_п+\alpha_д=\alpha_и$ $$\alpha_д=\frac{188}{\sqrt{\varepsilon_r}\rho'_i}\frac{1}{1+1{,}735\varepsilon_r^{-0{,}0724}\left(\frac{w}{h}\right)^{-0{,}836}}\ Нп/м,$$ где ρ'_i — удельное сопротивление основания, *Ом·см*	(20)	
$$\frac{\alpha_п z_0 h}{R_s}\partial Б=\frac{8{,}68}{2\pi}\left[1-\left(\frac{W_{эфф}}{4h}\right)^2\right]\left[1+\frac{h}{W_{эфф}}+\frac{h}{\pi W_{эфф}}\left(\ln\frac{4\pi W}{t}+\frac{t}{W}\right)\right]\partial Б;$$	(21)	При $\frac{w}{h}\leqslant\frac{1}{2\pi}$.
$$\frac{\alpha_п z_0 h}{R_s}\partial Б=\frac{8{,}68}{2\pi}\left[1-\left(\frac{W_{эфф}}{4h}\right)^2\right]\left[1+\frac{h}{W_{эфф}}+\frac{h}{\pi W_{эфф}}\left(\ln\frac{2h}{t}-\frac{t}{h}\right)\right]\ \partial Б,$$ где $\alpha_п$ — потери в проводниках, *дБ/см*; h — высота несимметричной полосковой линии, *см*; R_s — поверхностное сопротивление, *Ом*	(22)	При $\frac{1}{2\pi}<\frac{w}{h}\leqslant 2$. Погрешность формул (21) и (22) не более $\pm 9\%$

Продолжение табл. 3

Расчет потерь α		Условия применимости
$W_{эфф}=W+\frac{t}{\pi}\ln\left(\frac{2h}{t}+1\right);$	(23)	$\frac{W}{h}\geqslant\frac{1}{2\pi}.$
$W_{эфф}=W+\frac{t}{\pi}\ln\left(\frac{4\pi W}{t}+1\right).$	(24)	$\frac{2t}{h}\leqslant\frac{W}{h}\leqslant\frac{1}{2\pi}.$

2.2.4. Эффективную диэлектрическую проницаемость определять по формуле

$$\varepsilon_{эфф}=\frac{\varepsilon_r+1}{2}+\frac{\varepsilon_r-1}{2}\frac{1}{\sqrt{1+\frac{10h}{w}}}. \qquad (25)$$

Точность формулы составляет $\pm 2\%$.

Длину волны в линии определять по формуле

$$\lambda_д=\frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_{эфф}}}. \qquad (26)$$

2.2.5. Критическую частоту поперечного резонанса волн H типа определять по формуле

$$f^{поп.\ рез}_{кр.\ H}=\frac{30}{\sqrt{\varepsilon_r}(2w+0,8h)}\ ГГц, \qquad (27)$$

где W — ширина полоскового проводника, *см*;

h — высота несимметричной полосковой линии, *см*.

Критическую частоту поверхностной волны типа E определять по формуле

$$f^{пов}_{кр.\ E}=0.$$

Критическую частоту наинизшей поверхностной волны типа H определять по формуле

$$f^{пов}_{кр.\ H}=\frac{7,5}{h\sqrt{\varepsilon_r-1}}\ ГГц, \qquad (28)$$

где h — высота несимметричной полосковой линии, *см*.

Частоту синхронизма, при которой происходит интенсивное возбуждение наинизшей поверхностной волны H типа основной волной, определять по формуле

$$f^{синхр.}_{H}=\frac{3C}{10h}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r-1}}\ Гц, \qquad (29)$$

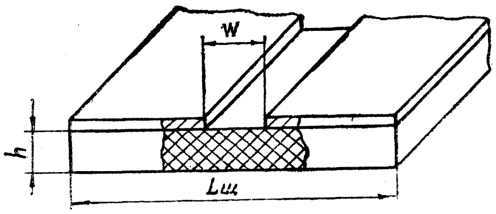
где $C=3\cdot10^{10}$ *см/с*.

2.3. Щелевые линии

2.3.1. Общий вид щелевой линии приведен на черт. 9.

2.3.2. Для уменьшения потерь на излучение в щелевой линии необходимо использовать основания с высокой диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon\approx 10$—20)

Линия щелевая



Черт. 9

2.3.3. Щелевые линии не имеют нижней частоты отсечки. В нулевом приближении длину волны в щелевой линии следует определять по формуле

$$\frac{\lambda_д}{\lambda}=\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r+1}}. \qquad (30)$$

Приведенная формула имеет погрешность не более 10%.

2.3.4. Эффективную диэлектрическую проницаемость ε'_r определять по формуле

$$\varepsilon'_r=\frac{\varepsilon_r+1}{2}. \qquad (31)$$

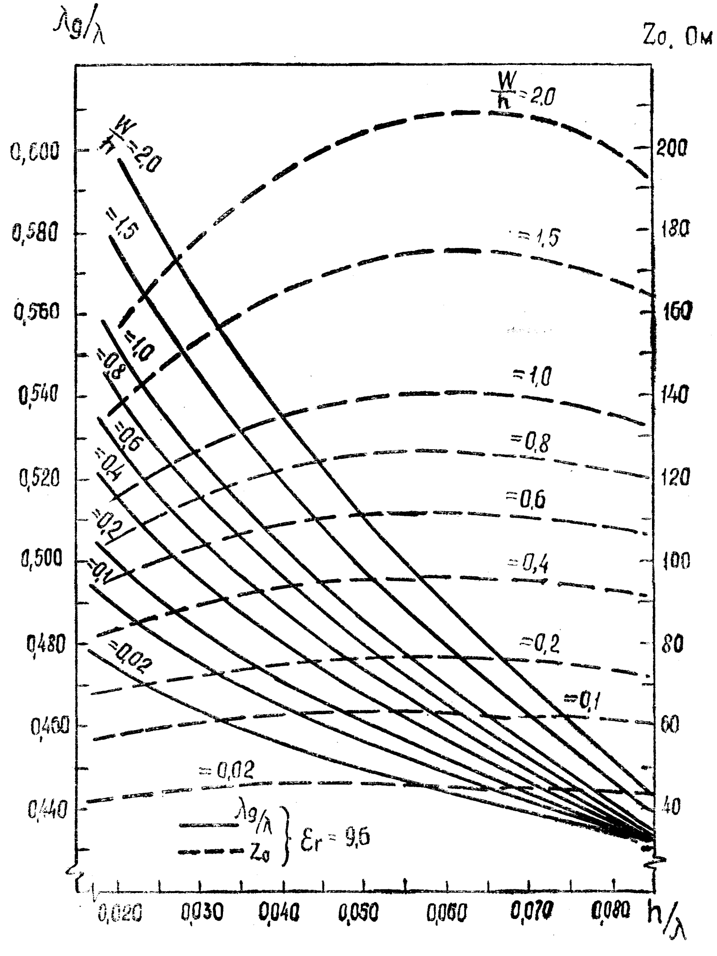
2.3.5. Зависимость волнового сопротивления и относительной длины волны в линии $\frac{\lambda_д}{\lambda}$ от нормированной толщины основания $\frac{h}{\lambda}$ приведена на черт. 10—14. Величины диэлектрической проницаемости на каждом чертеже разные.

2.3.6. Щелевые линии являются перспективными при реализации невзаимных ферритовых устройств, фильтров, направленных ответвителей и ряда других устройств.

2.3.7. Длина пластин щелевой линии в поперечном сечении определяется по формуле

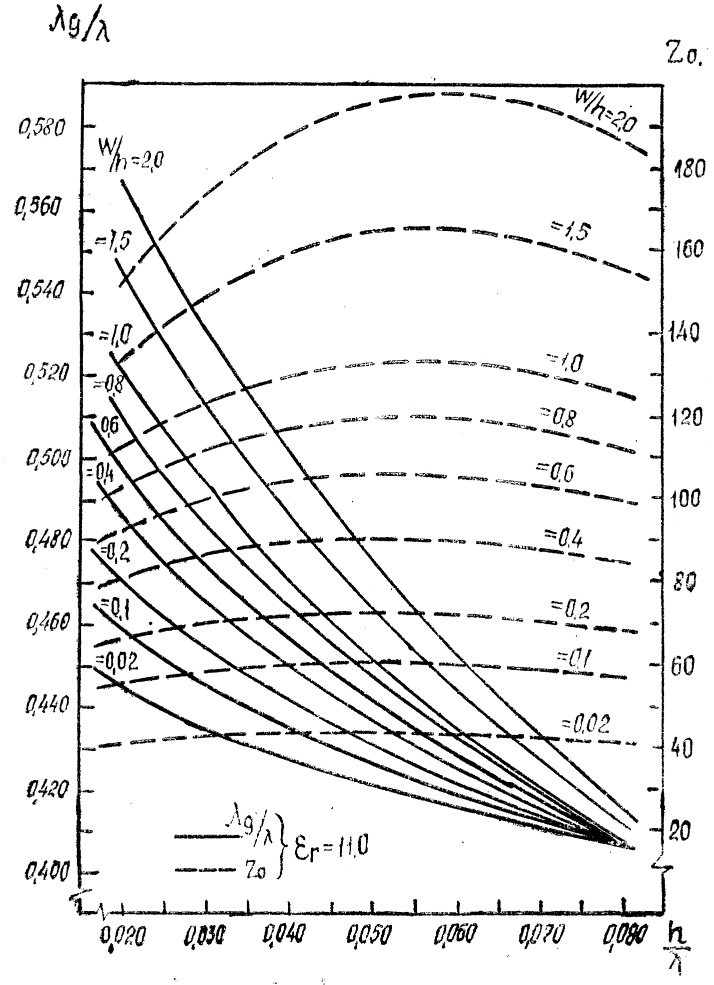
$$L_щ>\frac{\lambda_д}{4\pi}.$$

Зависимость волнового сопротивления и относительной длины волны в линии $\frac{\lambda_g}{\lambda}$ от нормированной толщины основания $\frac{h}{\lambda}$ при $\varepsilon_r = 9{,}6$



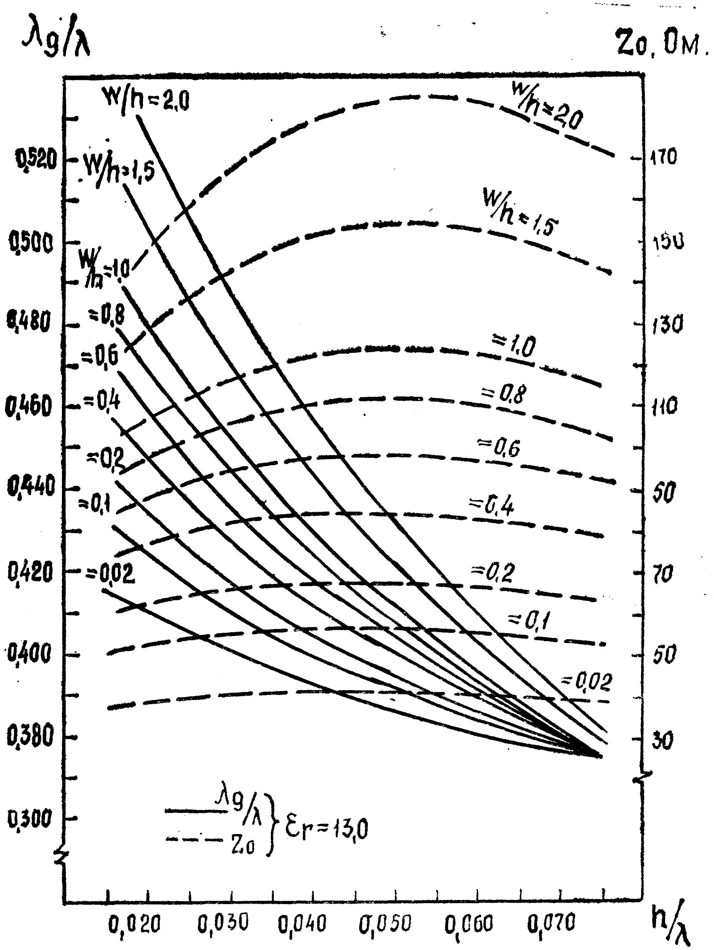
Черт. 10

Зависимость волнового сопротивления и относительной длины волны в линии $\frac{\lambda_g}{\lambda}$ от нормированной толщины основания $\frac{h}{\lambda}$ при $\varepsilon_r = 11$



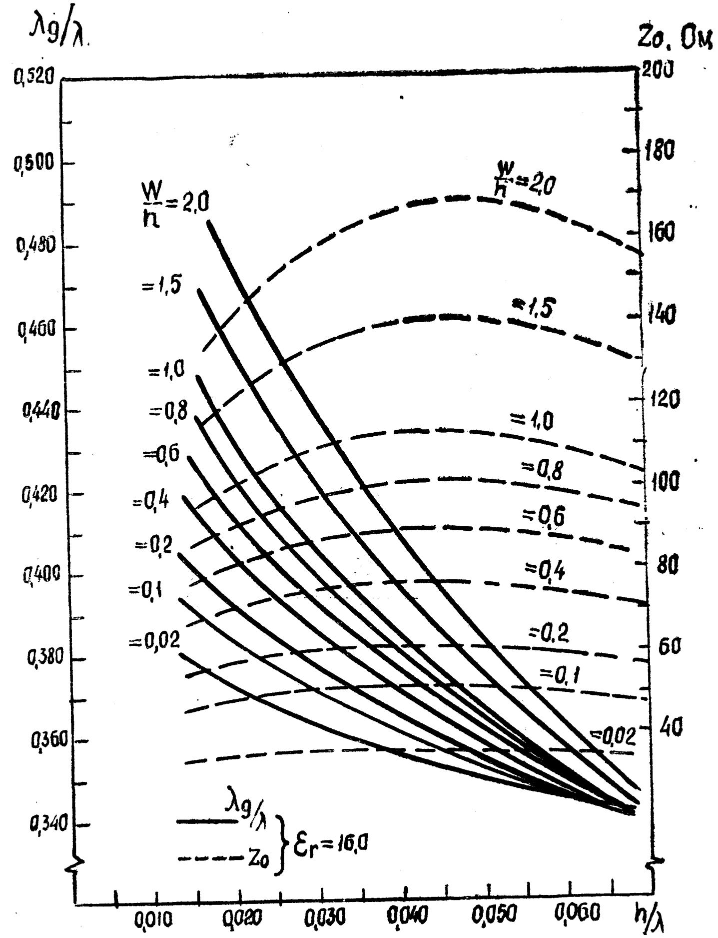
Черт. 11

Зависимость волнового сопротивления и относительной длины волны в линии $\frac{\lambda_д}{\lambda}$ от нормированной толщины основания $\frac{h}{\lambda}$ при $\varepsilon_r = 13$



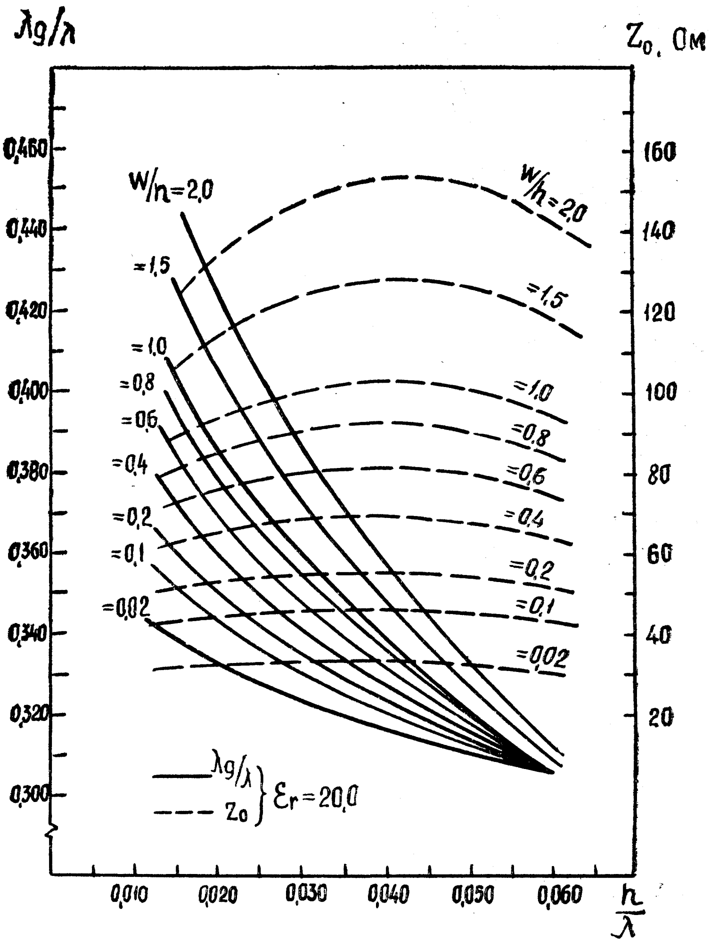
Черт. 12

Зависимость волнового сопротивления и относительной длины волны в линии $\frac{\lambda_д}{\lambda}$ от нормированной толщины основания $\frac{h}{\lambda}$ при $\varepsilon_r = 16$



Черт. 13

Зависимость волнового сопротивления и относительной длины волны в линии $\frac{\lambda_д}{\lambda}$ от нормированной толщины основания $\frac{h}{\lambda}$ при $\varepsilon_r = 20$



Черт. 14

2.4. Копланарные линии

2.4.1. Общий вид копланарной линии приведен на черт. 15.

2.4.2. Волновое сопротивление копланарной линии следует определять по формуле

$$z_0 = \frac{1}{C' v_ф} Ом. \qquad (32)$$

2.4.3. Емкость копланарной линии на единицу длины определять по формуле

$$C' = (\varepsilon_r + 1)\varepsilon_0 \frac{2K(k_1)}{K(k_1^1)} Ф/м, \qquad (33)$$

где ε_r — диэлектрическая проницаемость основания;

ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, *Ф/м;*

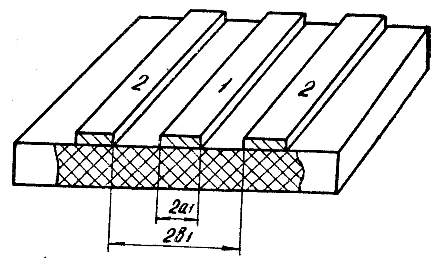
$K(k_1)$ — полный эллиптический интеграл первого рода,

$$k_1 = \frac{a_1}{b_1}, \qquad k_1^1 = \sqrt{1 - k_1^2}$$

$2a_1$ — ширина центральной полоски, *мм*;

$2b_1$ — расстояние между заземленными пластинами, *мм*.

Линия копланарная



1 — проводник центральный;
2 — пластины заземленные.

Черт. 15

2.4.4. Фазовую скорость $V_ф$ основного типа волны в копланарной линии следует определять по формуле

$$V_ф = c\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}}, \qquad (34)$$

где с — скорость света в вакууме.

Зависимость нормированной фазовой скорости $\frac{V_ф}{c}$ от ε_r основания приведена на черт. 16.

2.4.5. Зависимость волнового сопротивления Z_0 копланарной линии от величины $\frac{a_1}{b_1}$ для различных ε_r приведена на черт. 17.

2.4.6. Толщина основания копланарных линий выбирается обычно в пределах (1:2) $(b_1 - a_1)$.

2.4.7. Копланарная линия не имеет нижней частоты отсечки.

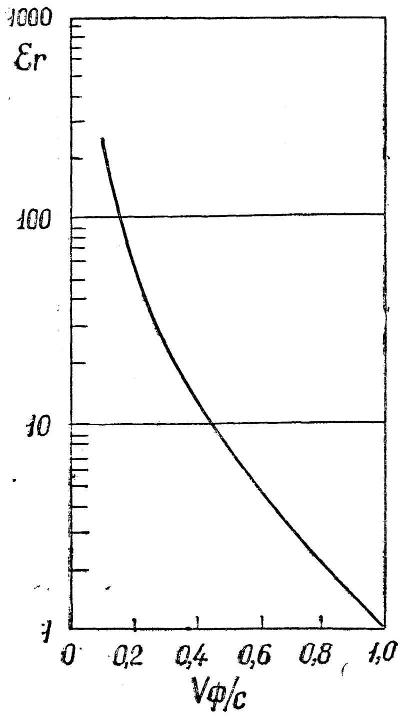
2.4.8. Копланарная линия является перспективной при разработке ферритовых вентилей, ферритовых фазовращателей, направленных ответвителей и ряда других полосковых элементов и узлов.

2.5. Высокодобротные полосковые линии (с частичным заполнением диэлектриком)

2.5.1. Поперечное сечение высокодобротной полосковой линии приведено на черт. 18.

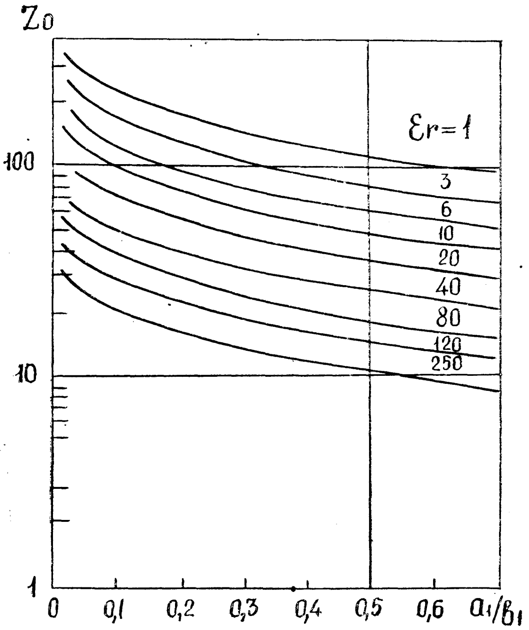
2.5.2. Зависимость волнового сопротивления линии Z_0 от геометрических размеров при $\varepsilon_r = 2{,}55$ приведена на черт. 19.

Зависимость нормированной фазовой скорости $\frac{V_ф}{c}$ от ε_r основания



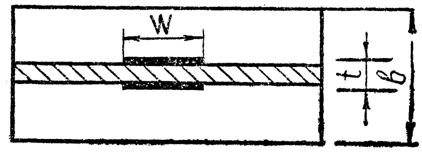
Черт. 16

Зависимость волнового сопротивления копланарной линии от ε_r основания



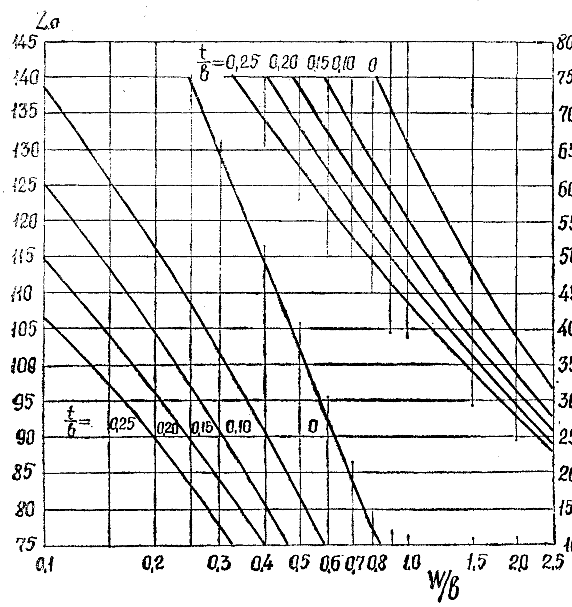
Черт. 17

Сечение высокодобротной полосковой линии



Черт. 18

Зависимость волнового сопротивления высокодобротной полосковой линии от геометрических размеров при $\varepsilon_r = 2{,}55$



Черт. 19

3. ФИЛЬТРЫ

3.1. Шлейфные фильтры с максимально плоской частотной характеристикой

3.1.1. Общий вид топологии центральной полоски шлейфного фильтра приведен на черт. 20.

3.1.2. Коэффициент передачи $|T_{11}|^2$ симметричных полоснопропускающих фильтров, состоящих из закороченных четвертьволновых шлейфов с разделяющими четвертьволновыми отрезками линий, с максимально-плоской частотной характеристикой определять по формуле

$$|T_{11}|^2 = 1 + K_n \frac{\cos^{2n}\Theta}{\sin^2\Theta}, \qquad (35)$$

где
$$K_n = \left[\frac{k_1(k_2+2)\dots(k_n+2)}{2}\right]^2;$$

$k_i = \frac{Y_{0i}}{Y_0}$ — нормированная волновая проводимость шлейфа;

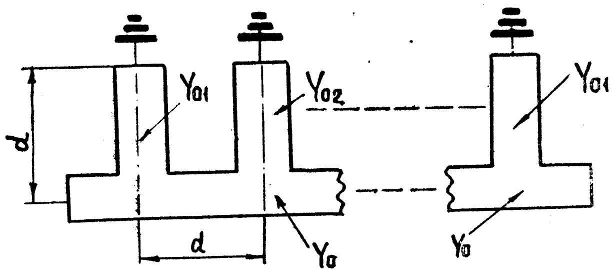
n — число шлейфов в фильтре;

$\Theta = \frac{2\pi l}{\lambda}$ — электрическая длина шлейфа;

l — геометрическая длина шлейфа;

λ — рабочая длина волны.

Топология центральной полоски шлейфного фильтра



Черт. 20

3.1.3. В частном случае для двухшлейфного фильтра (фильтр включен между генератором и нагрузкой, сопротивления которых равны соответственно волновому сопротивлению линии передачи, и в силу симметрии $k_1 = k_2 = k$) рабочее затухание определять по формуле

$$|T_{11}|^2 = 1 + \frac{[k(k+2)]^2 \cos^4\Theta}{4\sin^2\Theta}. \qquad (36)$$

3.1.4. Величины 10lgKn и соответствующие величины нормированных волновых проводимостей шлейфов для n=3—10 приведены в табл. 4—11. Исходя из симметричности фильтров, указаны только величины нормированных проводимостей шлейфов для первой половины фильтра.

Таблица 4

Зависимость величин $10\lg K_3$ и k_n для $n=3$

$10\lg K_3$	k_1	k_2
—12,728	0,100	0,200
— 0,944	0,300	0,600
+ 5,460	0,500	1,000
+10,138	0,700	1,400
+15,560	1,000	2,000
+21,156	1,400	2,800
+27,604	2,000	4,000
+31,904	2,500	5,000
+35,563	3,000	6,000

Таблица 5

Зависимость величин $10\lg K_n$ и k_n для $n=4$

$10\lg K_4$	k_1	k_2
— 5,170	0,1	0,292
+ 3,253	0,2	0,571
+13,329	0,4	1,109
+25,668	0,8	2,141
+35,909	1,3	3,395
+44,873	1,9	4,877
+56,734	3,0	7,568

Таблица 6

Зависимость величин $10\lg K_n$ и k_n для $n=5$

$10\lg K_5$	k_1	k_2	k_3
+ 3,452	0,100	0,366	0,532
+13,577	0,200	0,694	0,989
+20,523	0,300	1,005	1,410
+26,002	0,400	1,304	1,808
+30,601	0,500	1,596	2,193
+38,160	0,700	2,166	2,933
+44,324	0,900	2,724	3,648
+54,172	1,300	3,819	5,038
+66,970	2,000	5,702	7,403
+77,874	2,800	7,829	10,058

Таблица 7

Зависимость величин $10\lg K_n$ и k_n для $n=6$

$10\lg K_6$	k_1	k_2	k_3
+13,378	0,100	0,419	0,755
+25,469	0,200	0,774	1,329
+33,805	0,300	1,106	1,838
+40,388	0,400	1,422	2,314
+50,721	0,600	2,031	3,207
+58,863	0,800	2,622	4,055
+65,668	1,000	3,202	4,878
+76,755	1,400	4,343	6,487
+85,687	1,800	5,468	8,045
+96,571	2,400	5,141	10,359

Таблица 8

Зависимость величин $10\lg K_n$ и k_n для n=7

$10\lg K_7$	k_1	k_2	k_3	k_4
+ 24,630	0,1	0,4556	0,9269	1,1425
+ 38,780	0,2	0,8259	1,5687	1,8856
+ 56,240	0,4	1,4949	2,6514	3,1129
+ 77,830	0,8	2,7308	4,5506	5,2396
+ 85,770	1,0	3,3268	5,4458	6,2379
+104,521	1,6	5,0774	9,0398	9,1249
+125,521	2,6	7,9395	12,2306	13,7822

Таблица 9

Зависимость величин $10\lg K_n$ и k_n для n=8

$10\lg K_8$	k_1	k_2	k_3	k_4
+ 37,11	0,1	0,480	1,050	1,455
+ 53,35	0,2	0,860	1,735	2,305
+ 73,35	0,4	1,543	2,881	3,691
+ 98,06	0,8	2,802	4,885	6,080
+107,14	1,0	3,409	5,829	7,199
+128,19	1,6	5,189	8,562	10,433
+139,08	2,0	6,359	10,340	12,535

Таблица 10

Зависимость величин $10\lg K_n$ и k_n для n=9

$10\lg K_9$	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
+ 50,68	0,1	0,4974	1,138	1,689	1,898
+ 69,02	0,2	0,8838	1,852	2,613	2,890
+ 91,56	0,4	1,5770	3,043	4,112	4,491
+119,39	0,8	2,8510	5,121	6,688	7,237
+129,60	1,0	3,4560	6,098	7,894	8,251
+153,30	1,6	5,2660	8,928	11,377	12,231
+176,00	2,4	7,6240	12,592	15,879	17,022

Таблица 11

Зависимость величин $10\lg K_n$ и k_n для n=10

$10\lg K_{10}$	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
+ 65,240	0,1	0,510	1,203	1,866	2,245
+ 85,660	0,2	0,901	1,938	2,842	3,340
+110,753	0.4	1,601	3,161	4,423	5,102
+141,690	0,8	2,887	5,292	7,138	8,117
+153,070	1,0	3,506	6,294	8,408	9,257
+179,390	1,6	5,322	9,195	12,076	13,596
+204,651	2,4	7, 699	12,249	16,815	18,851

3.1.5. Семейство кривых, иллюстрирующее зависимость относительной ширины полосы пропускания $\frac{\Delta f}{f_0}$ на уровне 3 *дБ* от величины $10\lg K_n$, приведено на черт. 21.

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_2 - f_1}{f_0} = \frac{2(f_0 - f_1)}{f_0}, \qquad (37)$$

где f_1 и f_2 — граничные частоты полосы пропускания по уровню 3 *дБ*;
f_0 — центральная частота полосы пропускания.

Формула (35) графически представлена на черт. 22—29 для n=3—10. Величина $10\lg K_n$ является параметром, электрическая длина Θ является независимой переменной.

Примечание. С учетом симметрии кривые на черт. 22—29 построены только в интервале 0—90°.

В интервале 90—180° характеристика фильтра является зеркальным отображением характеристики, построенной в интервале 0—90°.

Зависимость рабочего затухания от параметра Θ приведена:

— для трехшлейфного фильтра на черт. 22;

— для четырехшлейфного фильтра на черт. 23;

— для пятишлейфного фильтра на черт. 24;

— для шестишлейфного фильтра на черт. 25;

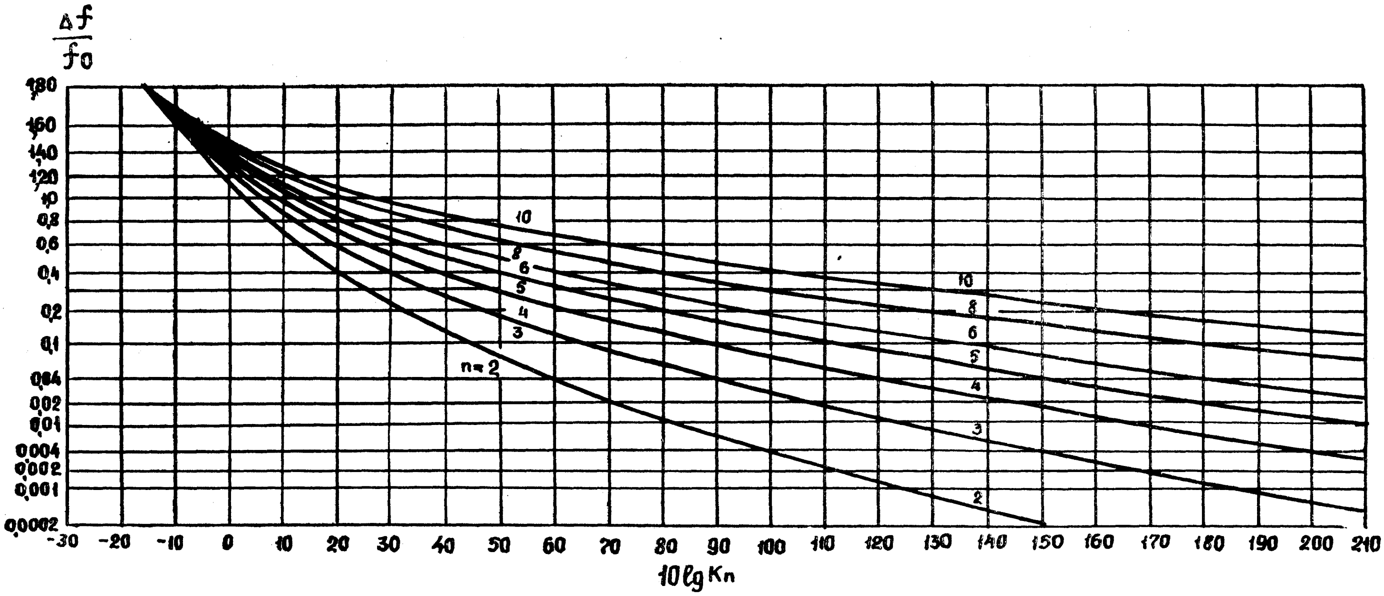
— для семишлейфного фильтра на черт. 26;

— для восьмишлейфного фильтра на черт. 27;

— для девятишлейфного фильтра на черт. 28;

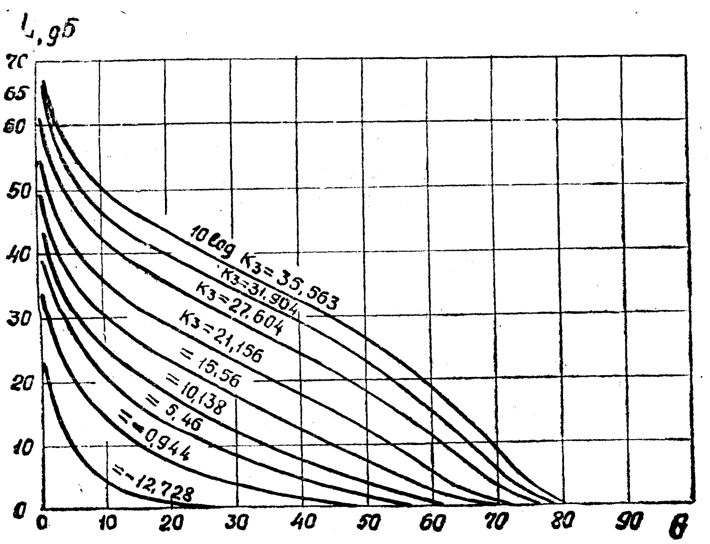
— для десятишлейфного фильтра на черт. 29.

Зависимость относительной ширины полосы пропускания на уровне 3дБ от величины 10 lg Kn



Черт. 21

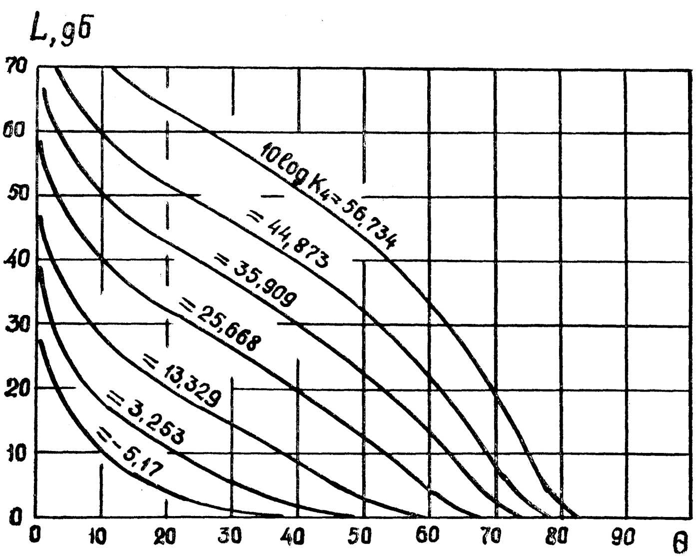
Зависимость рабочего затухания от параметра Θ для трехшлейфного фильтра



$L = 10 \lg |T_{11}|^2$

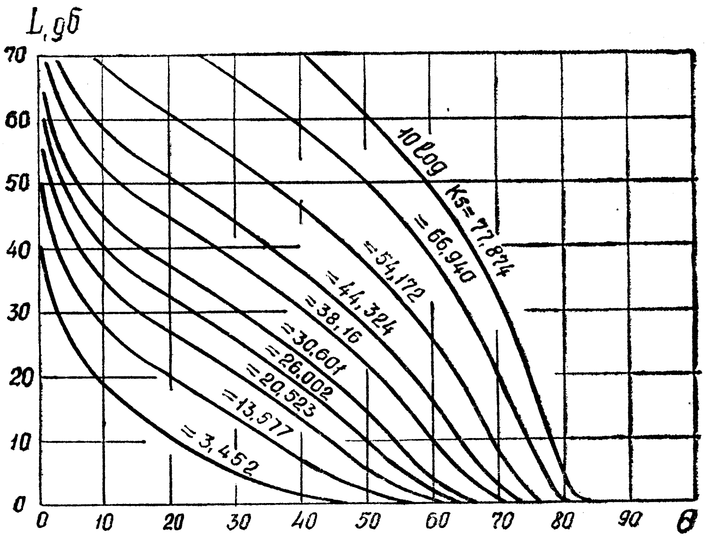
Черт. 22

Зависимость рабочего затухания от параметра Θ для четырехшлейфного фильтра



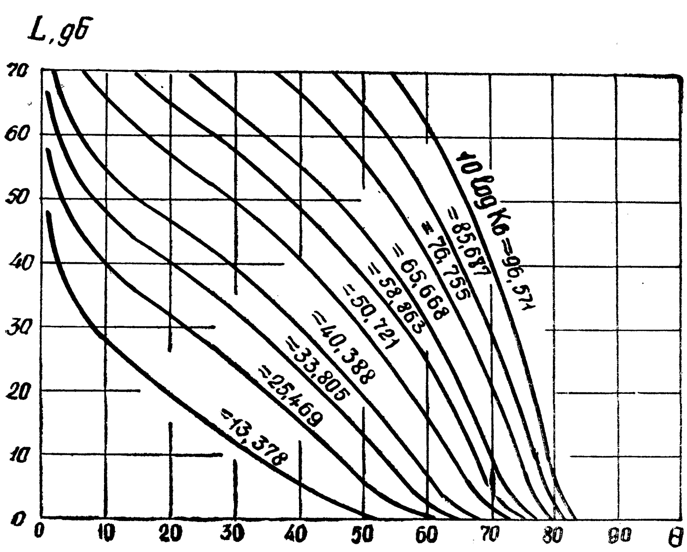
Черт. 23

Зависимость рабочего затухания от параметра Θ для пятишлейфного фильтра



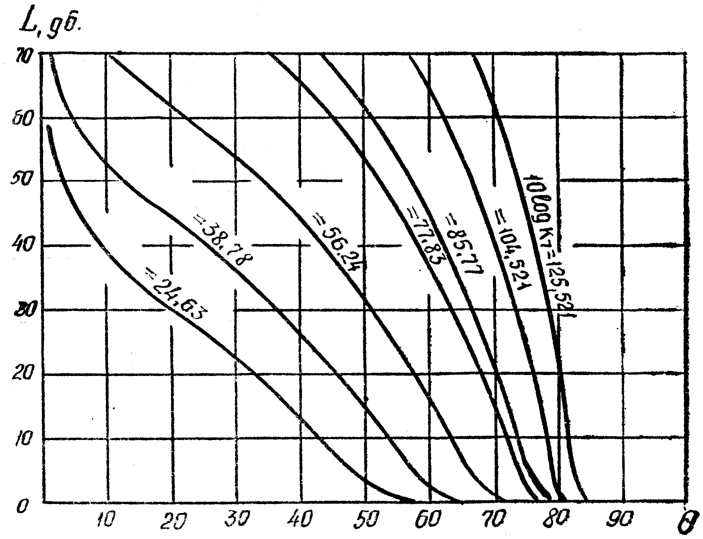
Черт. 24

Зависимость рабочего затухания от параметра Θ для шестишлейфного фильтра



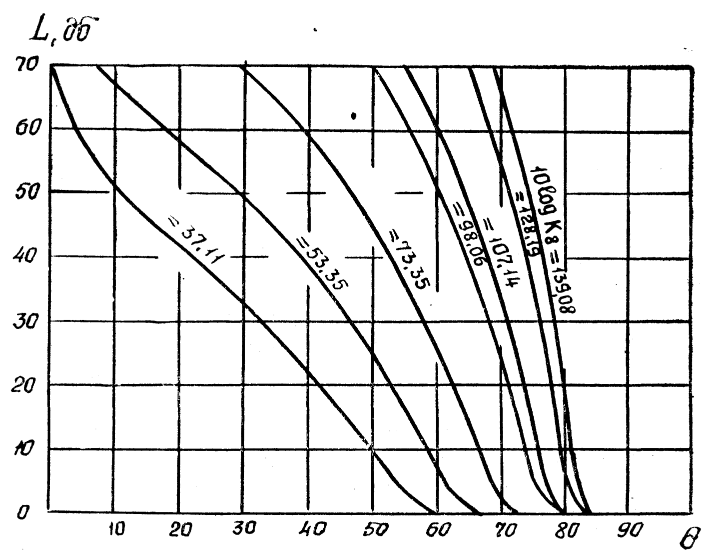
Черт. 25

Зависимость рабочего затухания от параметра Θ для семишлейфного фильтра



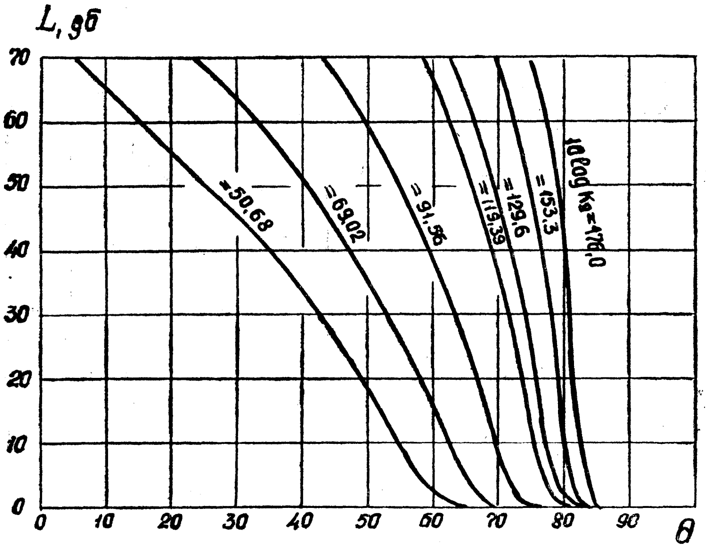
Черт. 26

Зависимость рабочего затухания от параметра Θ для восьмишлейфного фильтра



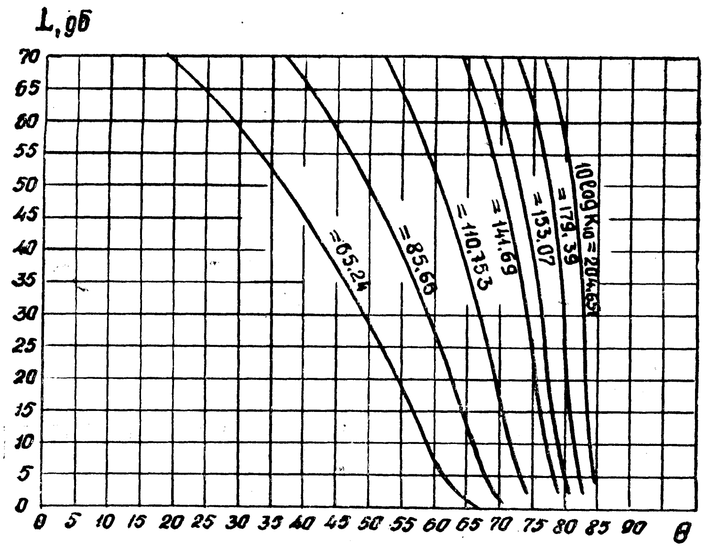
Черт. 27

Зависимость рабочего затухания от параметра Θ для девятишлейфного фильтра



Черт. 28

Зависимость рабочего затухания от параметра Θ для десятишлейфного фильтра



Черт. 29

3.1.6. При полуволновых длинах шлейфов фильтр превращается в полосно-заграждающий и формула (35) с соответствующими графическими иллюстрациями может быть использована для его расчета.

3.2. Полосно-пропускающие фильтры из одинаковых шлейфов

3.2.1. Расчет рабочего затухания полосно-пропускающих фильтров из одинаковых четвертьволновых шлейфов, разделенных четвертьволновыми отрезками линий передачи, производить по формуле

$$L = 10\lg\left\{1 + \frac{k^2q^2}{4(1-q^2)}\cdot P_n\left[q\left(1+\frac{k}{2}\right)\right]\right\}, \qquad (38)$$

где L — рабочее затухание, *дБ*;
k — нормированная проводимость шлейфа;
n — число шлейфов;
$q = \cos\Theta$

$\Theta = \frac{2\pi l}{\lambda}$ — электрическая длина шлейфа;

l — геометрическая длина шлейфа;
λ — рабочая длина волны;
P_n — полином Чебышева второго рода, который в общем случае представляет собой следующее выражение:

$$P_{n-1}(x) = \frac{\sin(n\cdot\arccos x)}{\sqrt{1-x^2}}, \qquad (39)$$

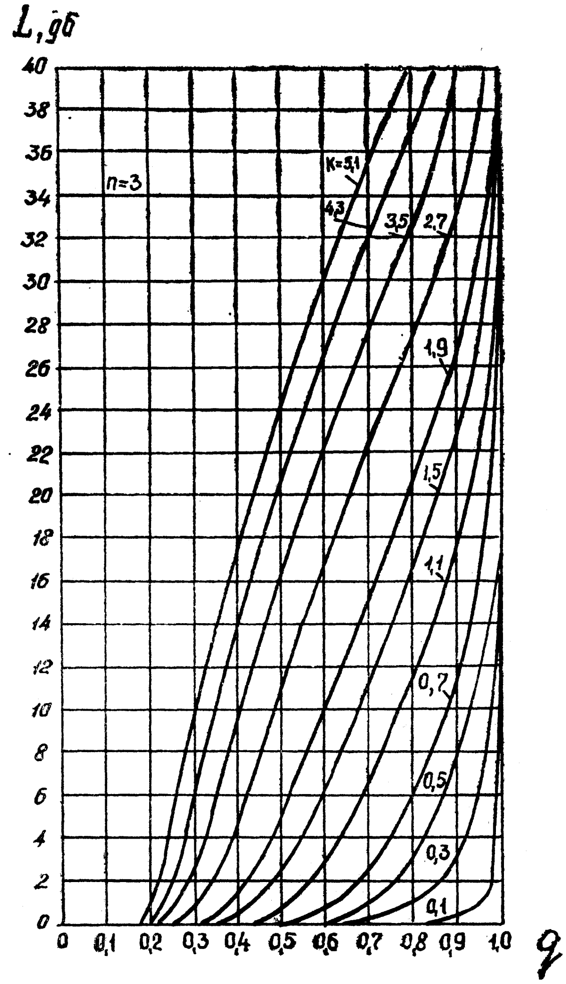
где x — независимая переменная.

Формула (39) не учитывает активные потери.

3.2.2. Зависимость рабочего затухания от параметра q для n=3 и n=4 приведена на черт. 30 и 31.

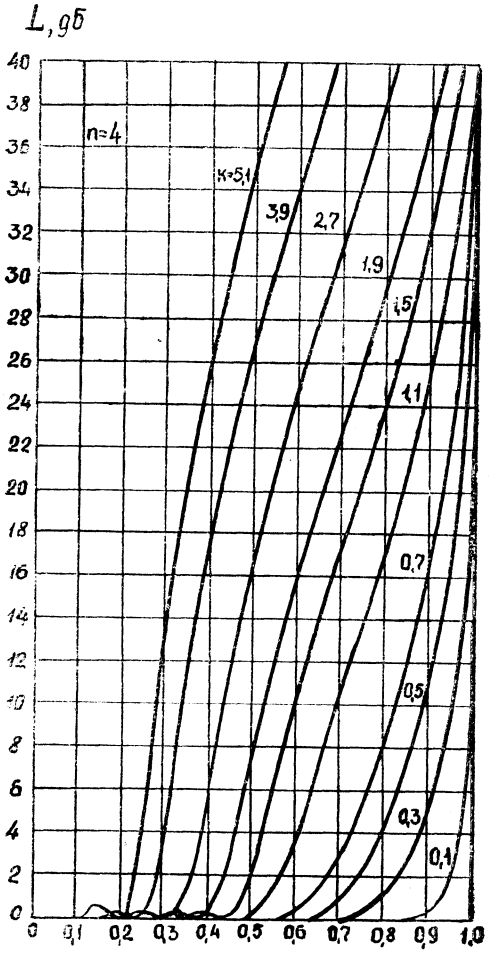
Частотная переменная q меняется от плюс 1 до минус 1 с изменением λ.

Зависимость рабочего затухания от параметра q для n=3



Черт. 30

Зависимость рабочего затухания от параметра q для n=4



Черт. 31

При q=0 величина вносимых потерь равна нулю для всех n и k. При q=±1 вносимые потери равны бесконечности (при сделанных предположениях) для всех n и k.

Поскольку P^2_n является четной функцией переменной q, можно ограничиться вычерчиванием кривых только в области $0 \leqslant q \leqslant 1$ в силу симметрии.

Для случаев n=1 и n=2 формулы для фильтров из одинаковых четвертьволновых шлейфов и фильтров с максимально-плоской частотной характеристикой совпадают.

3.3. Прототипы фильтров СВЧ

3.3.1. При расчете фильтров СВЧ можно воспользоваться эквивалентными схемами с сосредоточенными постоянными, что позволит применить хорошо известный аппарат расчета низкочастотных фильтров.

При выбранных параметрах исходного низкочастотного фильтра-прототипа, необходимо рассчитать фильтр СВЧ с заданным рабочим затуханием в полосе пропускания и заграждения. В качестве фильтра-прототипа используется фильтр нижних частот с максимально-плоской и чебышевской частотными характеристиками затухания.

3.3.2. Рабочее затухание фильтра нижних частот с максимально-плоской частотной характеристикой показано на черт. 32.

Расчет рабочего затухания фильтра L с максимально-плоской частотной характеристикой производить по формуле

$$L = 10\lg\left\{1 + \left(10^{\frac{L_п}{10}} - 1\right)(\omega')^{2n}\right\}, \qquad (40)$$

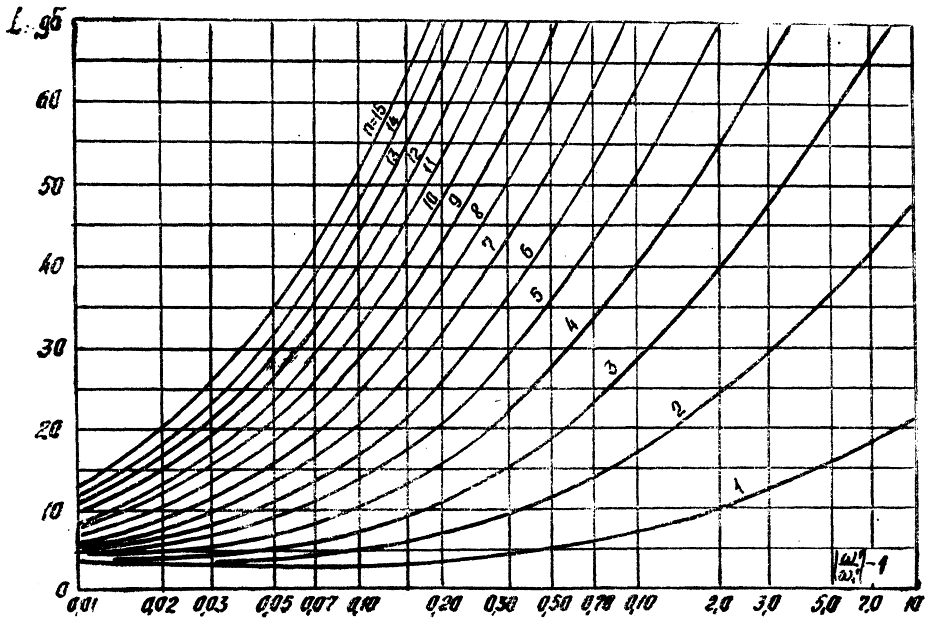
где $L_п$ — потери в полосе пропускания, *дБ;*

$\omega' = \frac{\omega}{\omega'_1}$ — круговая частота, нормированная по граничной частоте характеристики фильтра (текущая частота);

n — число реактивных элементов.

На границе полосы пропускания $\omega' = \omega'_1 = 1$

Зависимость рабочего затухания фильтра нижних частот с максимально-плоской частотной характеристикой



Черт. 32

3.3.3. Схема фильтра-прототипа с сосредоточенными параметрами приведена на черт. 33.

Схемы, изображенные на черт. 33, *а* и 33, *б*, имеют идентичные частотные характеристики и любая из них может быть использована для расчета.

Активное сопротивление, показанное на схеме, можно рассматривать как внутреннее сопротивление генератора.

3.3.4. Численные значения параметров элементов g_i при $n=2—20$ для $L_n=3$ *дБ*, $\omega'_1=1$, $g_0=1$ приведены в табл. 1 приложения 3.

Рабочее затухание фильтров с чебышевской частотной характеристикой следует рассчитывать по формуле

$$L=10\lg\left[1+\left(10^{\frac{L_n}{10}}-1\right)T_n^2(\omega')\right], \qquad (43)$$

где T_n — полином Чебышева первого рода.

В случае нечетного числа элементов

$$g_0=g_{n+1}.$$

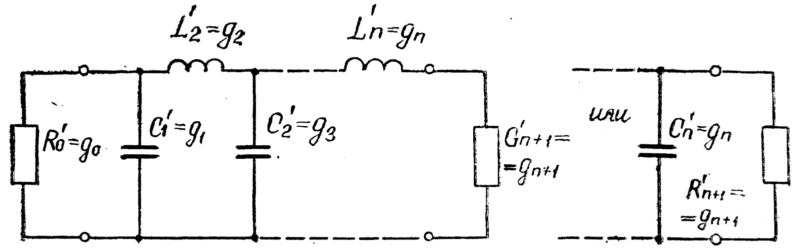
При четном числе элементов

$$g_{n+1}=r=\text{th}^2\frac{\beta}{4},$$

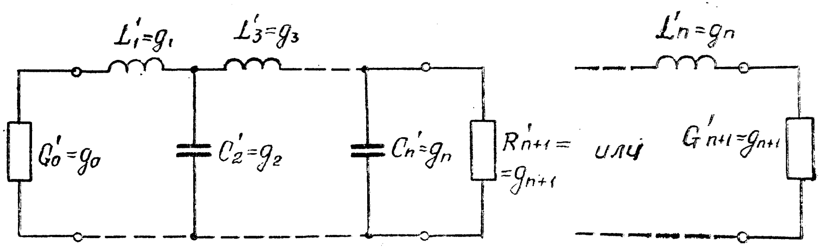
где

$$\beta=\ln\text{cth}\frac{b_n}{17,37}.$$

Фильтр-прототип с сосредоточенными параметрами



а)



б)

Черт. 33

$g_{i(i=1-n)}$ — последовательная индуктивность или параллельная емкость схемы фильтра-прототипа;

g_0 — сопротивление генератора R_0, если $g_1=C'_1$, или проводимость генератора G'_0, если $g_1=L'_1$;

g_{n+1} — сопротивление нагрузки R'_{n+1} если $g_n=C'_n$, или проводимость нагрузки G'_{n+1}, если $g_n=L'_n$.

Параметры элементов схемы фильтра-прототипа следует рассчитывать по формулам

$$q_i=2\sqrt[n]{h'}\sin\frac{(2i-1)\pi}{2n};\ i=1,\ 2,\ ...,\ n; \qquad (41)$$

$$q_{n+1}=1;$$

$$h'=\frac{|\Gamma|_{max}}{\sqrt{1-|\Gamma|^2_{max}}},$$

где $|\Gamma|_{max}$ — максимальный коэффициент отражения в полосе пропускания, причем

$$L_n=10\lg\left[\frac{1}{1-|\Gamma|^2_{max}}\right]=10\lg(1+h'^2). \qquad (42)$$

Определение числа элементов n фильтра-прототипа нижних частот в случае максимально-плоской

частотной характеристики производить по формуле

$$n=\frac{\lg\left(\sqrt{\frac{L_з-1}{L_п-1}}\right)}{\lg\left(\frac{\omega'_з}{\omega'_п}\right)}, \qquad (44)$$

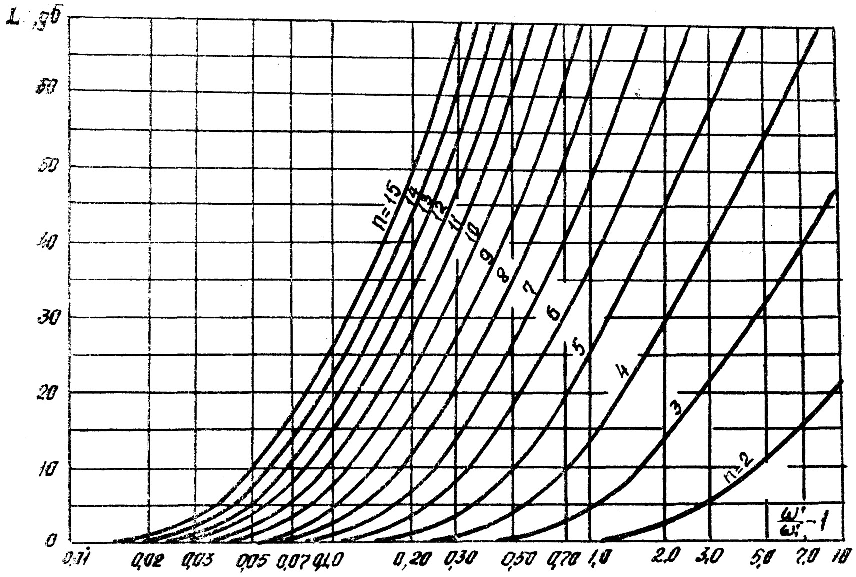
и в случае чебышевской частотной характеристики производить по формуле

$$n=\frac{\operatorname{Arcch}\left(\sqrt{\frac{L_з-1}{L_п-1}}\right)}{\operatorname{Arcch}\left(\frac{\omega'_з}{\omega'_п}\right)}, \qquad (45)$$

где $L_з$ — минимальный уровень рабочего затухания в полосе заграждения;
$\omega'_з$ — граничная частота полосы заграждения;
$\omega'_п$ — граничная частота полосы пропускания.

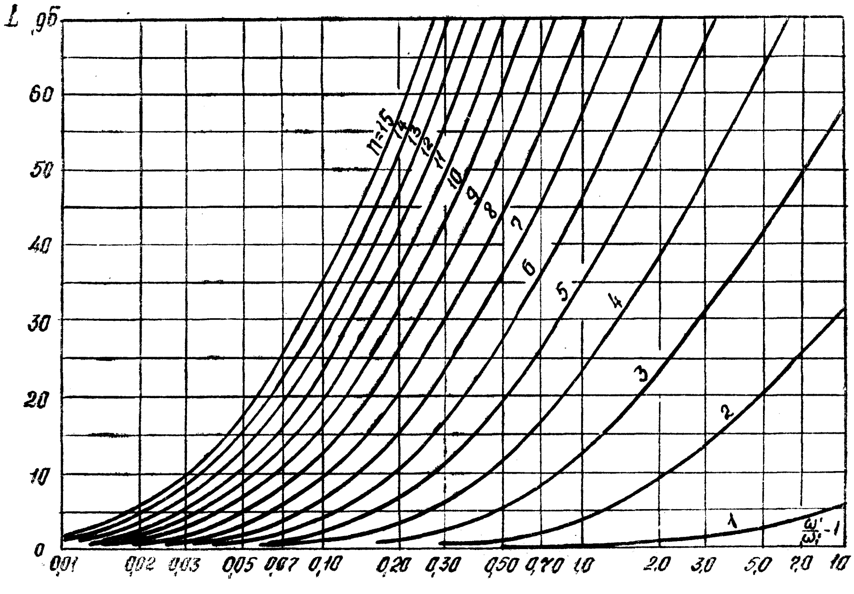
Характеристики рабочего затухания в полосе заграждения для фильтров с чебышевскими частотными характеристиками с разными пульсациями в полосе пропускания приведены на черт. 34—40.

Зависимость рабочего затухания фильтра с чебышевской частотной характеристикой при $L_п = 0{,}01$ дБ



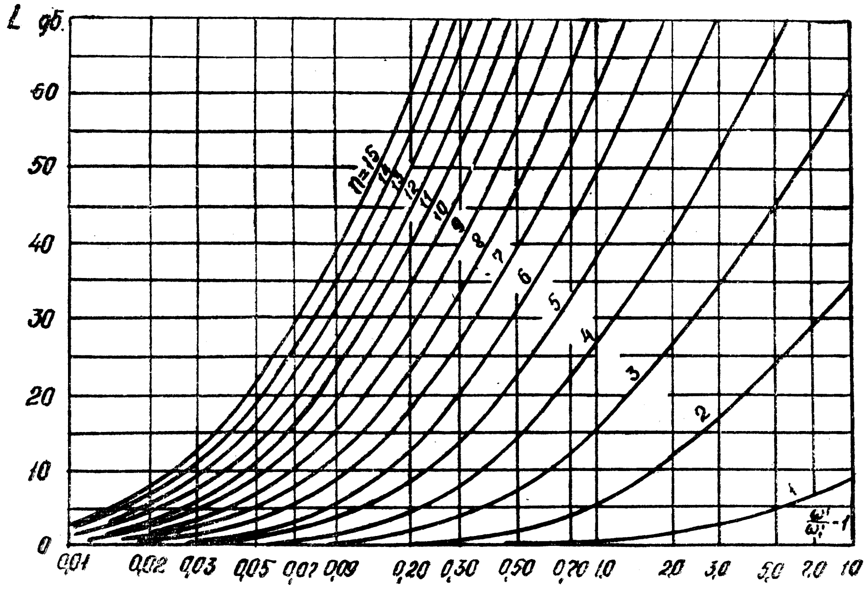
Черт. 34

Зависимость рабочего затухания фильтра с чебышевской частотной характеристикой при $L_п = 0{,}1$ дБ



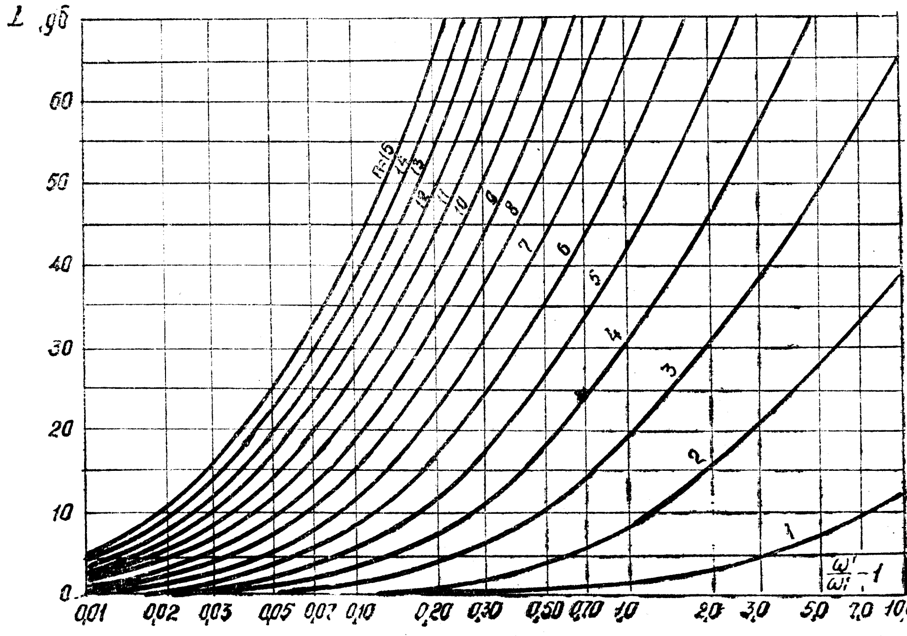
Черт. 35

Зависимость рабочего затухания фильтра с чебышевской частотной характеристикой при Lп = 0,2 дБ



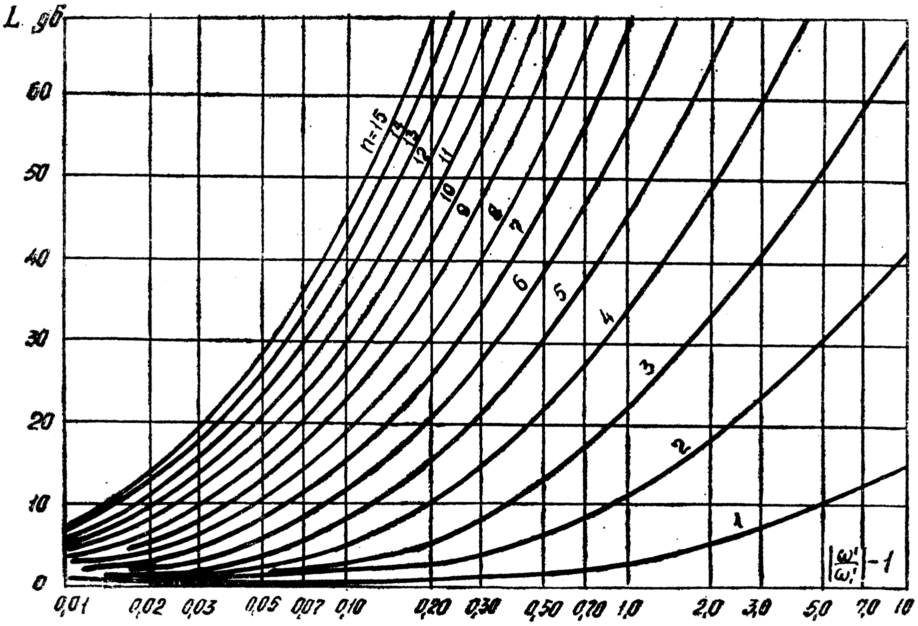
Черт. 36

Зависимость рабочего затухания фильтра с чебышевской частотной характеристикой при $L_п = 0,5$ дБ



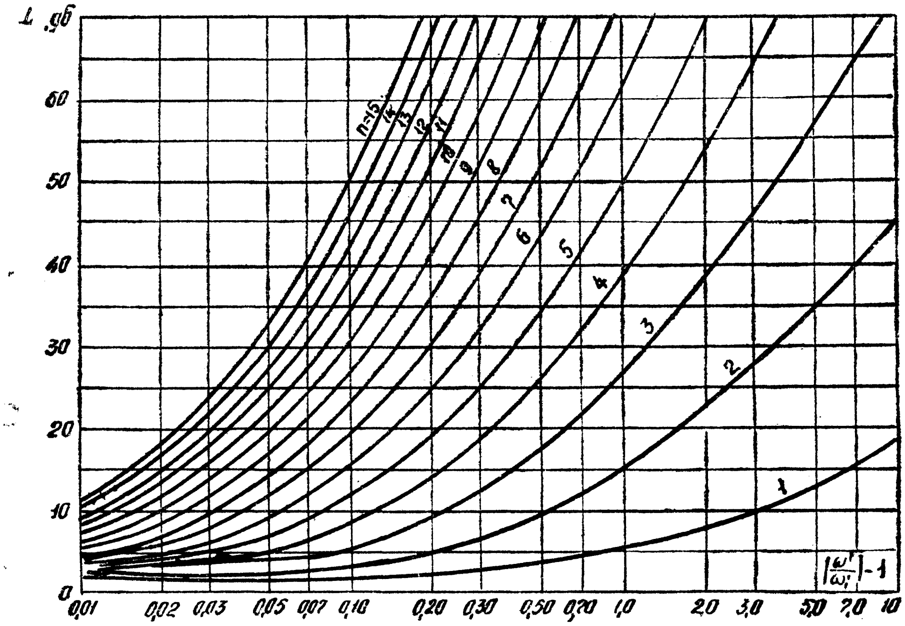
Черт. 37

Зависимость рабочего затухания фильтра с чебышевской частотной характеристикой при $L_п = 0{,}1$ $дБ$



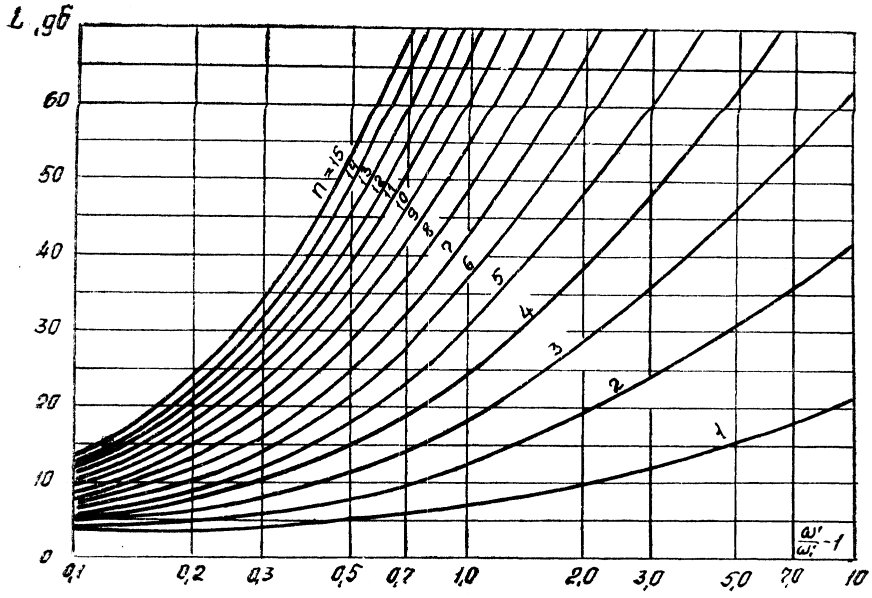
Черт. 38

Зависимость рабочего затухания фильтра с чебышевской частотной характеристикой при $L_п = 0{,}2$ $дБ$



Черт. 39

Зависимость рабочего затухания фильтра с чебышевской частотной характеристикой при $L_п = 0{,}3$ *дБ*



Черт. 40

Для фильтра нижних частот с чебышевской частотной характеристикой при нечетном числе элементов нагрузочное сопротивление слева и справа одинаковое

$$g_0 = g_{n+1}.$$

В случае четного числа элементов

$$g_{n+1} = r = \mathrm{th}^2\left(\frac{\beta}{4}\right), \ (g_0 = 1), \qquad (46)$$

где

$$\beta = \ln\left(\mathrm{cth}\,\frac{L_п}{17{,}37}\right). \qquad (47)$$

Параметры элементов фильтра вычислять по формулам

$$g_i = \frac{2a_1}{y} \qquad (48)$$

и

$$g_i = \frac{4a_{i-1}\,a_i}{b_{i-1}g_{i-1}}; \quad i = 2, 3, \ldots, n, \qquad (49)$$

где вспомогательные параметры следует рассчитывать по формулам

$$a_i = \sin\left[\frac{2(i-1)\pi}{2n}\right]; \qquad (50)$$

$$b_i = y^2 + \sin^2\left(\frac{i\pi}{n}\right); \qquad (51)$$

$$y = \mathrm{sh}\frac{\beta}{2n}. \qquad (52)$$

При нечетном числе элементов $g_n = g_1$, при четном $g_n = g_1 r$.

3.3.5. Численные значения параметров элементов $g_1, g_2, \ldots, g_n$, r для $n = 2$—20, $L_п = 0{,}01$; 0,1—1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 *дБ* приведены в табл. 2 приложения 3.

3.4. Полосно-пропускающие фильтры из полуволновых резонаторов с боковой связью

3.4.1. Фильтр из полуволновых резонаторов с боковой связью представляет собой ряд полосок (приблизительно полуволновых), расположенных параллельно друг другу через определенный интервал. Фильтр из полуволновых резонаторов с боковой связью представлен на черт. 41.

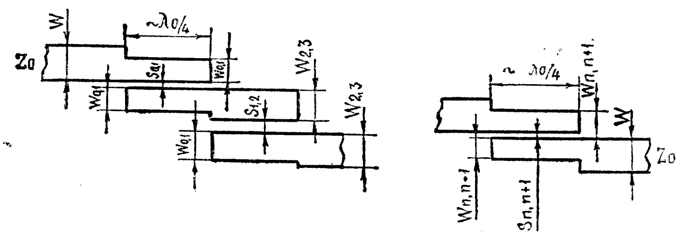
В каждой паре связанных полосок, расположенных между заземленными плоскостями, существуют два типа колебаний: четный и нечетный. Каждому типу колебаний соответствует свое волновое сопротивление:

Z_{0e} — сопротивление четного типа колебаний;

Z_{00} — сопротивление нечетного типа колебаний.

3.4.2. Волновые сопротивления четного и нечетного типов волн (для связанных симметричных полосковых линий в случае пренебрежимо малой тол-

Фильтр из полуволновых резонаторов с боковой связью



Черт. 41

щины полоски и при выполнении условия $\frac{W}{b} \geqslant 0{,}35$) следует определять по формулам

$$Z_{oe} = \frac{\frac{94{,}15}{\sqrt{\varepsilon_r}}}{\frac{W}{b} + \ln\frac{2}{\pi} + \frac{1}{\pi}\ln\left[1 + \operatorname{th}\left(\frac{\pi s}{2b}\right)\right]} \qquad (53)$$

и

$$Z_{oo} = \frac{\frac{94{,}15}{\sqrt{\varepsilon_r}}}{\frac{W}{b} + \ln\frac{2}{\pi} + \frac{1}{\pi}\ln\left[1 + \operatorname{cth}\left(\frac{\pi s}{2b}\right)\right]}\ . \qquad (54)$$

При толщине полоски в пределах 0,05—0,30 *мм* влиянием толщины можно пренебречь.

Примечание. В формулах (53), (54) для краткости опущены индексы i, i+1 у величин W и S (см. черт. 41).

Точность формул (53), (54) составляет приблизительно 1% при $\frac{W}{b} = 0{,}35$ и возрастает при $\frac{W}{b} \geqslant 0{,}35$.

Между волновыми сопротивлениями четного и нечетного типов колебаний и значением параметра $\varkappa$, характеризующим полосу пропускания фильтра, существуют следующие соотношения:

$$(Z_{oe})_{i,i+1} = Z_o\left[1 + \varkappa_{i,i+1} + \varkappa^2_{i,i+1}\right] \qquad (55)$$

и

$$(Z_{oo})_{i,i+1} = Z_o\left[1 - \varkappa_{i,i+1} + \varkappa^2_{i,i+1}\right], \qquad (56)$$

где

$$\varkappa_{0,1} = \sqrt{\frac{\frac{\pi \Delta f}{f_0}}{2 g_o g_1}} = \varkappa_{n,n+1}, \qquad (57)$$

$$\varkappa_{i,i+1} = \frac{\frac{\pi \Delta f}{f_0}}{\sqrt{2 g_i g_{i+1}}} \text{ для } (n-1) \geqslant i > 1\,. \qquad (58)$$

Уравнения (55), (56) справедливы для узкополосного случая (ширина полосы до 30%).

3.4.3. Величина $\frac{s}{b}$ выражается через параметр $\varkappa$ следующим образом:

$$\frac{s}{b} = \frac{1}{\pi}\ln\operatorname{cth}\left[\frac{94{,}15}{\sqrt{\varepsilon_r} Z_o} \cdot \frac{\varkappa_{i,i+1}(1 - \varkappa^2_{i,i+1})}{(1 - \varkappa^6_{i,i+1})}\right]. \qquad (59)$$

3.4.4. Относительную ширину полоски $\frac{W}{b}$ следует рассчитывать по формуле

$$\frac{W}{b} = \frac{94{,}15}{\sqrt{\varepsilon_r} Z_0 (1 + \varkappa + \varkappa^2)} - \frac{1}{\pi}\ln\left[1 + \operatorname{th}\left(\frac{\pi s}{2b}\right)\right] - \frac{\ln 2}{\pi} \qquad (60)$$

или по формуле

$$\frac{W}{b} = \frac{94{,}15}{\sqrt{\varepsilon_r} Z_0 (1 - \varkappa + \varkappa^2)} - \frac{1}{\pi}\ln\left[1 + \operatorname{cth}\left(\frac{\pi s}{2b}\right)\right] - \frac{\ln 2}{\pi}. \qquad (61)$$

Уравнения (59)—(61) применимы для случая $0{,}5 \geqslant \varkappa \geqslant 0$. Индексы i, i+1 для краткости опущены. Для случая $\varkappa > 0{,}5$ данная теория не распространяется.

3.5. Узкополосные полосно-пропускающие фильтры с торцовыми связями на симметричных полосковых линиях

3.5.1. Расчет полосно-пропускающих фильтров такого типа основан на использовании элементов фильтра-прототипа нижних частот. Фильтр с торцовой связью состоит из нескольких полосок приблизительно полуволновой длины, разделенных зазорами определенной ширины.

3.5.2. Нормированная реактивная проводимость зазора такого фильтра связана с шириной полосы пропускания посредством следующего отношения:

$$B_{i,i+1} = \frac{\varkappa_{i,i+1}}{1 - \varkappa^2_{i,i+1}}, \qquad (62)$$

где $\varkappa_{0,1} = \sqrt{\frac{\frac{\pi \Delta f}{f_0}}{2 g_o g_1}} = \varkappa_{n,n+1}$ для $n \geqslant i \geqslant 1$; (63)

$$\varkappa_{i,i+1} = \frac{\frac{\pi \Delta f}{f_0}}{2\sqrt{g_i g_{i+1}}}\,. \qquad (64)$$

$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_2 - f_1}{f_0}$ — нормированная ширина полосы пропускания;

f_0 — резонансная частота;

f_1, f_2 — границы полосы пропускания по уровню 3 *дБ*;

n — число резонаторов фильтра;

g_i — величины элементов фильтра-прототипа нижних частот.

Сопротивления генератора и нагрузки, между которыми включен фильтр, одинаковы.

3.5.3. Электрические длины резонаторов фильтра следует определять по формуле

$$\Theta_i=180^\circ-\frac{1}{2}\left(\operatorname{arctg} 2B_{i-1,i}+\operatorname{arctg}2B_{i,i+1}\right). \qquad (65)$$

3.5.4. Эквивалентная схема зазора в случае симметричной полосковой линии приведена на черт. 42.

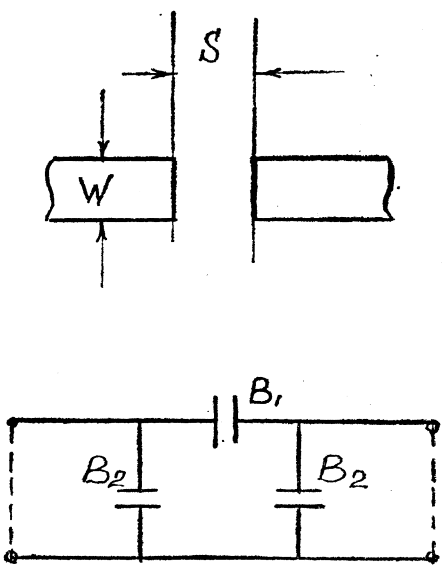
Схема имеет вид последовательной емкости с нормированной реактивной проводимостью B_1 и двух параллельных емкостей с нормированными реактивными проводимостями B_2, которые представлены следующим образом:

$$B_1=\frac{b}{\lambda_д}\ln cth\frac{\pi s}{2b}; \qquad (66)$$

$$B_2=-\frac{2b}{\lambda}\ln ch\frac{\pi s}{2b}, \qquad (67)$$

где $\lambda_д$ — длина волны в полосковой линии;
b — расстояние между заземленными пластинами;
s — величина зазора.

Схема зазора для фильтра из полуволновых резонаторов с торцовой связью



Черт. 42

Величиной B_2, как правило, можно пренебречь, так как она значительно меньше B_1. Так при $\frac{s}{b}=0{,}14$ получим

$$\frac{B_2}{B_1}=-\frac{0{,}0078}{0{,}25}\approx-0{,}03.$$

Величиной B_2 можно пренебрегать при $\frac{s}{b}<0{,}5$.

Величины $S_{i,i+1}$ можно выразить следующим образом:

$$\frac{S_{i,i+1}}{b}=\frac{1}{\pi}\ln\left[cth\left(\frac{B_{i,i+1}\lambda_д}{2b}\right)\right] \qquad (68)$$

или, выразив значение $B_{i,i+1}$ через частотный параметр $\varkappa$, можно представить

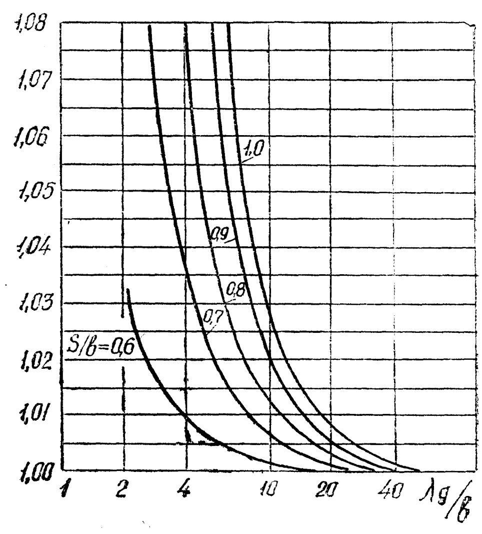
$$\frac{s_{i,i+1}}{b}=\frac{1}{\pi}\ln\left[cth\left(\frac{\lambda_д}{2b}\frac{\varkappa_{i,i+1}}{1-\varkappa^2_{i,i+1}}\right)\right]. \qquad (69)$$

Так как емкости связи между резонаторами вызывают изменения электрической длины резонаторов, то расстояние между центрами зазоров становятся отличными от $\frac{\lambda_д}{2}$ и каждый конец резонатора следует укоротить на величину $\Delta\Theta$. В формулу (65) входит величина B_{ij}, которая является функцией параметров $B_{1,i,j}$ и $B_{2,i,j}$ и имеет следующий вид:

$$B_{i,j}=\frac{B_{1,i,j}}{1+B_{2i,j}(2B_{1,i,j}+B_{2,i,j})}. \qquad (70)$$

Для $\frac{s}{b}>0{,}1$ при расчете длин резонаторов необходимо учитывать параллельную емкость зазоров $B_{2,i,j}$ Формула (66) при $\frac{s}{b}\leqslant0{,}6$ имеет погрешность меньше 1%; при $\frac{s}{b}>0{,}6$ необходимо ввести поправочный коэффициент, определяемый по графику, приведенному на черт. 43.

Поправка на величину B_1



Черт. 43

3.6. Сравнение полосно-пропускающих фильтров из полуволновых резонаторов с боковой и торцовой связью

3.6.1. Преимущество фильтра с боковой связью— существенно меньшая длина по сравнению с фильтром на резонаторах с торцовой связью. Недостатки такого фильтра: существенно большая ширина и больший объем вычислений, чем в случае фильтра с торцовыми связями.

3.6.2. Производить выбор типа фильтра с точки зрения влияния технологических допусков на изготовление при заданных требованиях по полосе пропускания, заграждения и при фиксированных волновых сопротивлениях подводящих линий Z_0 и расстоянии между заземленными пластинами b. Для полоснопропускающих фильтров на полосковых линиях с $Z_0=50$ *Ом* при выполнении соотношения $b<\frac{\lambda_o}{12}$, где λ_o — средняя длина волны в воздухе, фильтры с боковой связью имеют сравнительно большие зазоры. При выполнении соотношения $b>\frac{\lambda_o}{7}$ фильтры с торцовыми связями будут иметь большие расстояния между полосками. При выполнении соотношения $\frac{\lambda_o}{7}>b>\frac{\lambda_o}{12}$ следует определить параметр $\varkappa=\sqrt{\frac{\frac{\pi\Delta f}{f_o}}{2\,д_{о}д_{1}}}$, который характеризует ширину полосы пропускания фильтра, и затем подставить его в формулу

$$\frac{\lambda_o}{b}=\frac{188{,}3\pi}{Z_o}\cdot\frac{(1-\varkappa^2)^2}{(1-\varkappa^6)}. \qquad (71)$$

В случае, если $\frac{\lambda_o}{b}$ больше величины, полученной по формуле (71), предпочтительнее использовать фильтры на резонаторах с торцовыми связями.

3.7. Учет потерь в фильтрах

3.7.1. Расчет потерь в фильтрах на средней частоте полосы пропускания следует производить по формуле

$$L\approx\frac{4{,}34f_o\sum\limits_{i=1}^{n}g_i}{\Delta f Q_o}\,дБ, \qquad (72)$$

где $\sum\limits_{i=1}^{n}g_i$ — сумма величин элементов фильтра-прототипа нижних частот;

n — число резонаторов фильтра;

$\frac{\Delta f}{f_o}$ — относительная ширина полосы пропускания фильтра;

Q_0 — ненагруженная добротность резонатора фильтра.

4. МОСТЫ

4.1. Кольцевые мосты

4.1.1. Общий вид кольцевого моста приведен на черт. 44.

4.1.2. Кольцевые мосты имеют следующие основные рабочие параметры:

— переходное затухание $C^{к}_{12}$;

— развязка $C^{к}_{14}$;

— неравномерность деления $\triangle C_к$.

Частотные характеристики рабочих параметров кольцевых схем приведены на черт. 45.

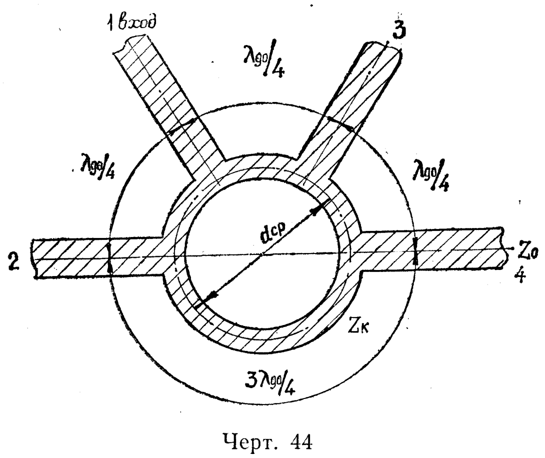
4.1.3. Расстояние между осями плеч следует выбирать равным $\frac{\lambda_{до}}{4}$; расстояние по длинной стороне выбирать равным $\frac{3\lambda_{до}}{4}$.

4.1.4. Диаметр средней окружности $d_{ср}$ определять по формуле

$$d_{ср}=\frac{3\lambda_{до}}{2\pi}. \qquad (73)$$

При этом не учитывается влияние неоднородности разветвлений.

Мост кольцевой



Черт. 44

4.1.5. Волновое сопротивление кольца определять по формуле

$$Z_к=Z_o\sqrt{2}. \qquad (74)$$

4.1.6. Рабочие параметры кольцевого моста на средней частоте с учетом затухания определять по формулам:

— коэффициент стоячей волны (со стороны входа 1)

$$K_{ст^v}\approx\frac{13\sqrt{2}\alpha l+4}{11\sqrt{2}\alpha l+4}; \qquad (75)$$

— переходное затухание $C^{к}_{12}$

$$C_{12}^{к}=20\lg\frac{6\sqrt{2}\alpha l+2}{3\alpha l+\sqrt{2}}\,дБ; \qquad (76)$$

— неравномерность деления $\Delta C_к$

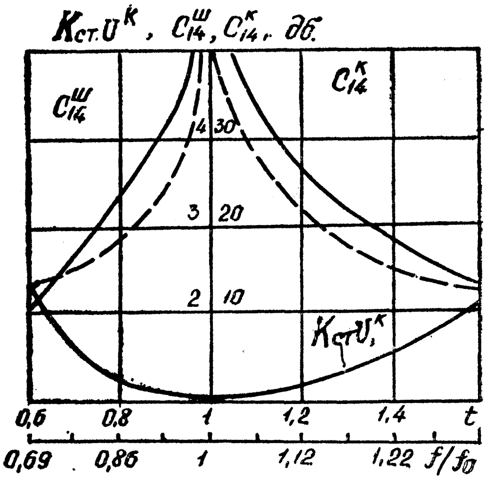
$$\Delta C_к=20\lg\frac{4\alpha l+\sqrt{2}}{3\alpha l+\sqrt{2}}\,дБ; \qquad (77)$$

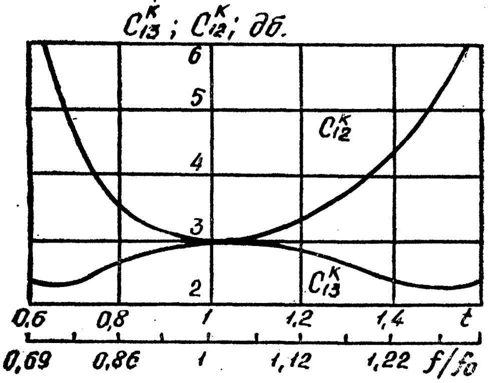
— развязка $C_{14}^{к}$

$$C_{14}^{к}=20\lg\frac{12\sqrt{2}\alpha l+4}{\sqrt{2}\alpha l}\,дБ; \qquad (78)$$

где αl — полное затухание четвертьволнового отрезка линии.

Характеристики частотные кольцевых мостов





Черт. 45

4.1.7. Частотную зависимость параметров кольцевого моста определять по формулам

— коэффициент стоячей волны

$$K_{стV}=\frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|};$$

— развязка

$$C_{14}^{к}=20\lg\frac{1}{|S_{14}|};$$

— переходное ослабление при подаче мощности из плеча *1* в плечо *2* $C_{12}^{к}$ и в плечо *3* $C_{13}^{к}$

$$C_{12}^{к}=20\lg\frac{1}{|S_{12}|};$$

$$C_{13}^{к}=20\lg\frac{1}{|S_{13}|};$$

— неравномерность деления мощности

$$\Delta C^{к}=|C_{12}^{к}-C_{13}^{к}|=20\lg\left|\frac{S_{13}}{S_{12}}\right|,$$

где

$$S_{11}=\frac{1}{2}\left[\frac{-4t^2(t^2+1)+j\sqrt{2}(4t^2-3t^5-1)}{14t^4-16t^2+2+j\sqrt{2}t(t^4-16t^2+5)}+\frac{4t(t^2+1)+j\sqrt{2}(4t^2-t^4-3)}{16t^3-2t^5-14t+j\sqrt{2}(5t^4-16t^2+3)}\right];$$

$$S_{12}=\frac{(1+t^2)(1-3t^2)}{14t^4-16t^2+2+j\sqrt{2}t(t^4-16t^2+5)}+\frac{(1+t^2)(1-3t^2)}{16t^3-2t^5-14t+j\sqrt{2}(5t^4-16t^2+3)};$$

$$S_{14}=\frac{(1+t^2)(t^3-3t)}{14t^4-16t^2+2+j\sqrt{2}t(t^4-16t^2+5)}-\frac{(1+t^2)(t^3-t)}{16t^3-2t^5-14t+j\sqrt{2}(5t^4-16t^2+3)};$$

$$t=\frac{tg\pi f}{(4f_0)}.$$

Величину S_{13} определить из условия унитарности:

$$|S_{13}|=\sqrt{1-|S_{11}|^2-|S_{12}|^2-|S_{14}|^2}.$$

4.1.8. При подключении к плечам *1—4* несогласованных нагрузок с комплексными коэффициентами отражения Γ_1, Γ_2, Γ_3, Γ_4 коэффициенты отражения и коэффициенты передачи по напряжению определять по формулам:

— передача со стороны плеча *1*

$$\Gamma_{1вх}=-\frac{2\Gamma_2\Gamma_3\Gamma_4+\Gamma_2+\Gamma_3}{2+\Gamma_4(\Gamma_2+\Gamma_3)} \qquad (79)$$

$$\frac{V_1}{V_2}=\frac{-j\varphi_1}{\sqrt{2}(1+\Gamma_2)(1+\Gamma_3\Gamma_4)};$$

$$\frac{V_1}{V_3}=\frac{-j\varphi_1}{\sqrt{2}(1+\Gamma_3)(1+\Gamma_2\Gamma_4)}$$

$$\frac{V_1}{V_4}=\frac{\varphi_1}{(1+\Gamma_4)(\Gamma_3-\Gamma_2)};$$

— передача со стороны плеча *2*

$$\Gamma_{2вх}=-\frac{2\Gamma_1\Gamma_3\Gamma_4+\Gamma_1+\Gamma_4}{2+\Gamma_3(\Gamma_1+\Gamma_4)}; \qquad (80)$$

$$\frac{V_2}{V_1}=-\frac{-j\varphi_2}{\sqrt{2}(1+\Gamma_1)(1+\Gamma_3\Gamma_4)};$$

$$\frac{V_3}{V_4}=\frac{\varphi_2}{(1+\Gamma_3)(\Gamma_1-\Gamma_4)};$$

$$\frac{V_2}{V_4}=\frac{j\varphi_2}{\sqrt{2}(1+\Gamma_4)(1+\Gamma_1\Gamma_3)};$$

— передача со стороны плеча *3*

$$\Gamma_{3вх}=-\frac{2\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_4+\Gamma_1+\Gamma_4}{2+\Gamma_2(\Gamma_1+\Gamma_4)}; \qquad (81)$$

$$\frac{V_3}{V_1}=\frac{-j\varphi_3}{\sqrt{2}(1+\Gamma_1)(1+\Gamma_2\Gamma^4)};$$

$$\frac{V_3}{V_4}=\frac{-j\varphi_3}{\sqrt{2}(1+\Gamma_4)(1+\Gamma_1\Gamma_2)};$$

$$\frac{V_3}{V_2}=\frac{\varphi_3}{(1+\Gamma_2)(\Gamma_1-\Gamma_4)};$$

— передача со стороны плеча *4*

$$\Gamma_{4вх}=\frac{2\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_3+\Gamma_3+\Gamma_2}{2+\Gamma_1(\Gamma_2+\Gamma_3)}; \qquad (82)$$

$$\frac{V_4}{V_1}=\frac{\varphi_4}{(1+\Gamma_1)(\Gamma_3-\Gamma_2)};$$

$$\frac{V_4}{V_3}=\frac{-j\varphi_4}{\sqrt{2}(1+\Gamma_3)(1+\Gamma_1\Gamma_2)};$$

$$\frac{V_4}{V_2}=\frac{j\varphi}{\sqrt{2}(1+\Gamma_2)(1+\Gamma_1\Gamma_3)},$$

где

$$\varphi_1=2(1+\Gamma_2\Gamma_3\Gamma_4)+(1+\Gamma_4)(\Gamma_2+\Gamma_3);$$

$$\varphi_2=2(1+\Gamma_1\Gamma_3\Gamma_4)+(1+\Gamma_3)(\Gamma_1+\Gamma_4);$$

$$\varphi_3=2(1+\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_4)+(1+\Gamma_2)(\Gamma_1+\Gamma_4);$$

$$\varphi_4=2(1+\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_3)+(1+\Gamma_1)(\Gamma_2+\Gamma_3).$$

Параметры моста относительно плеча *1* определять по формулам:

— коэффициент стоячей волны

$$K_{стV}=\frac{1+|\Gamma_{1вх}|}{1-|\Gamma_{1вх}|}; \qquad (83)$$

— переходное затухание $C^{к}_{12}$ и $C^{к}_{13}$

$$C^{к}_{12}=20\lg\left|\frac{V_1}{V_2}\right| дБ, \qquad (84)$$

$$C^{к}_{13}=20\lg\left|\frac{V_1}{V_3}\right| дБ, \qquad (85)$$

— неравномерность деления $\Delta C^{к}$

$$\Delta C_{к}=|C^{к}_{12}-C^{к}_{13}|\ дБ. \qquad (86)$$

$$|C^{к}_{12}-C^{к}_{13}|$$

4.1.9. Варианты кольцевых мостов приведены на черт. 46.

4.2. Шлейфные мосты

4.2.1. Общий вид двухшлейфного моста приведен на черт. 47.

4.2.2. Основные рабочие параметры определять по следующим формулам:

— рабочее затухание C_{12} (рабочее затухание — отношение мощностей на входе и выходе основного канала)

$$C_{12}=10\lg У^2_{01}\quad дБ; \qquad (87)$$

— переходное ослабление C_{13}

$$C_{13}=10\lg\left(\frac{1}{У^2_{ш1}}+1\right) дБ; \qquad (88)$$

— коэффициент деления мощности C_{23}

$$C_{23}=10\lg\frac{1}{У^2_{ш1}} дБ; \qquad (89)$$

где $Y_{ш1}=\frac{Z_0}{Z_{ш1}}$ и $Y_{01}=\frac{Z_0}{Z_{01}}$ —нормированные волновые проводимости шлейфов и отрезков между шлейфами.

4.2.3. Теоретическую величину направленности в диапазоне частот C_{34} определять по формуле

$$C_{34}=20\lg\left|\sin\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{f_0}{f}-1\right)\right]\right| дБ, \qquad (90)$$

где f_0 — средняя частота характеристики направленности;

f — текущее значение частоты в рабочей полосе.

4.2.4. Частотная характеристика развязки двухшлейфного моста показана пунктиром на черт. 45.

4.2.5. Общий вид трехшлейфного моста приведен на черт. 48.

4.2.6. Основные рабочие параметры трехшлейфного моста определять по следующим формулам:

— рабочее затухание C_{12}

$$C_{12}=10\lg\left(\frac{У^2_{ш1}+1}{У^2_{ш1}-1}\right)^2 дБ, \qquad (91)$$

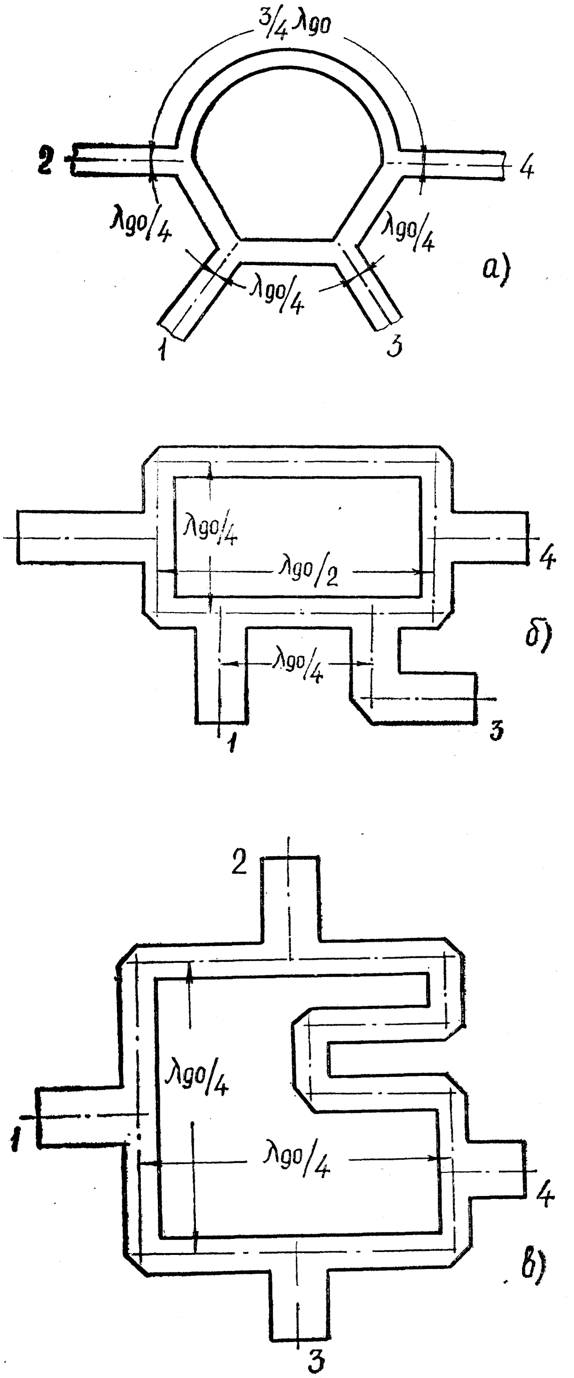
— переходное ослабление C_{13}

$$C_{13}=10\lg\left(\frac{У^2_{ш1}+1}{2У_{ш1}}\right)^2 дБ; \qquad (92)$$

— коэффициент деления мощности C_{23}

$$C_{23}=10\lg\left(\frac{У^2_{ш1}-1}{2У_{ш1}}\right)^2 дБ. \qquad (93)$$

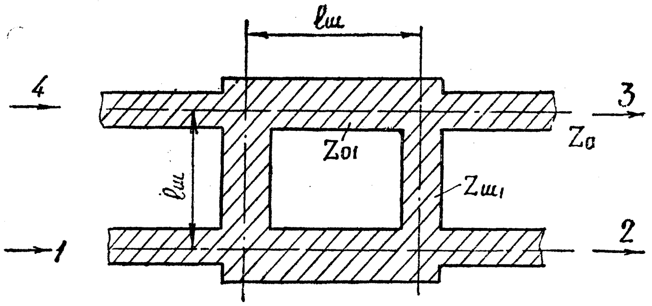
Варианты кольцевых мостов



а) мост полукольцевой; б) мост прямоугольный; в) мост прямоугольный с меандром

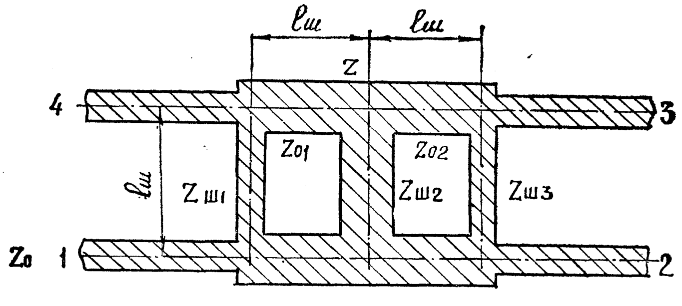
Черт. 46

Мост двухшлейфный



Черт. 47

Мост трехшлейфный



Черт. 48

4.2.7. Значения нормированных проводимостей шлейфов $У_{шi}$ и отрезков между ними $У_{0i}$ для случая полного согласования с нагрузками приведены в табл. 12.

Таблица 12

Параметр	Число шлейфов n	
	2	3
Нормированные проводимости	$У_{01}=1+У^2_{ш1}=\sqrt{2}$ $У_{ш1}=У_{ш2}=1$	$У_{ш1}=У_{ш3}=\sqrt{2}-1$ $У_{ш2}=У_{01}=У_{02}=\sqrt{2}$

4.2.8. При известных величинах комплексных коэффициентов отражения Γ_2, Γ_3, Γ_4 рабочие параметры определять по следующим формулам:

— коэффициент стоячей волны (со стороны входа 1)

$$K_{ст\,v}=\frac{2+|\Gamma_3-\Gamma_2|}{2-|\Gamma_3-\Gamma_2|}; \qquad (94)$$

— комплексный коэффициент отражения на входе со стороны плеча *1*

$$\Gamma_{1вх}=-\frac{2\Gamma_2\Gamma_3\Gamma_4+\Gamma_2-\Gamma_3}{2+\Gamma_4(\Gamma_3-\Gamma_2)}; \qquad (95)$$

— переходное ослабление C_{13}

$$C_{13}=20\lg\left|\frac{2+\Gamma_2-\Gamma_3}{(1+\Gamma_3)\sqrt{2}}\right| \partial Б; \quad (96)$$

— рабочее затухание C_{12}

$$C_{12}=20\lg\left|\frac{2+\Gamma_2-\Gamma_3}{(1+\Gamma_2)\sqrt{2}}\right| \partial Б; \quad (97)$$

— развязка C_{14}

$$C_{14}=20\lg\left|\frac{2+\Gamma_2-\Gamma_3}{(1+\Gamma_4)(\Gamma_2+\Gamma_3)}\right| \partial Б; \quad (98)$$

— коэффициент деления мощности C_{23}

$$C_{23}=10\lg\left|\frac{1+\Gamma_3}{1+\Gamma_2}\right| \partial Б; \quad (99)$$

4.2.9. Для периодических ответвителей выполняется условие $Y_{0i}=Y_0$, а проводимости крайних шлейфов, выбранные из условия обеспечения согласования ответвителя, равны между собой. Параметры $У_{ш1}$ и $У_{ш2}$ периодических ответвителей с переходным ослаблением 3 *дБ* ($У_{0i}=У_0$) приведены в табл. 13.

Таблица 13

Параметр	Число шлейфов n		
	3	4	5
$У_{ш1}$	0,414	0,234	0,209
$У_{ш2}$	0,707	0,542	0,381

4.2.10. Длину шлейфов и расстояние между ними определять по формуле

$$l_ш=\frac{\lambda_{до}}{4} \quad (100)$$

При этом не учитывается влияние неоднородностей разветвлений.

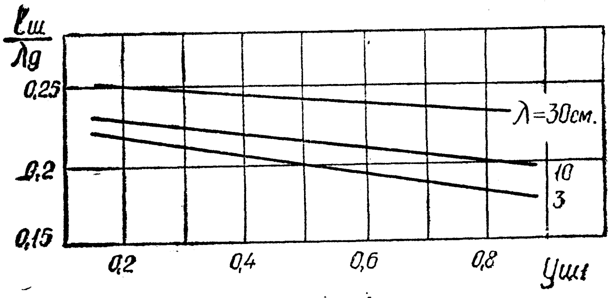
4.2.11. Широкополосность шлейфных мостов в зависимости от числа шлейфов оценивать из данных, приведенных в табл. 14.

Таблица 14

Параметр	Число шлейфов n		
	2	3	4
K_f	1,1	1,25	1,8

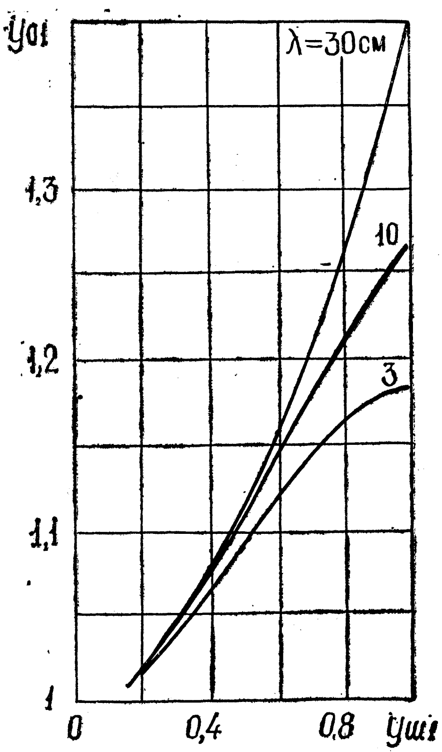
4.2.12. При расчете двухшлейфных мостов для компенсации неоднородностей в местах подключения шлейфов следует производить коррекцию длин шлейфов и величины нормированной проводимости отрезков между ними с помощью графиков, приведенных на черт. 49, 50.

Коррекция длины шлейфов



Черт. 49

Коррекция величины нормированной проводимости отрезков между шлейфами



Черт. 50

5. НАПРАВЛЕННЫЕ ОТВЕТВИТЕЛИ

5.1. Шлейфные направленные ответвители

5.1.1. Общий вид топологии центральной полоски шлейфного направленного ответвителя приведен на черт. 51.

Двухшлейфные направленные ответвители при приемлемом $\Gamma_{вх}$ обеспечивают переходное ослабление от минус 5 до минус 15 *дБ*, трехшлейфные — от минус 3 до минус 10 *дБ*.

5.1.2. Длины шлейфов направленного ответвителя и расстояния между ними следует приближенно выбирать равными четверти средней длины волны в полосковой линии

$$l_ш=\frac{\lambda_{до}}{4}. \quad (101)$$

5.1.3. Величины нормированных проводимостей шлейфов $У_{шi}$ и соединительных отрезков между ними $У_{oi}$ (в случае согласования направленного ответвителя с нагрузками и при пренебрежении реактивностями соединения шлейфов) приведены в табл. 15.

Таблица 15

Параметр	Число шлейфов n	
	2	3
Нормированные проводимости	$У^2_{01}=1+У^2_{ш1}$ $У_{ш1}=У_{ш2}$	$У_{ш2}=\frac{2У_{ш1}-У^2_{01}}{1+У^2_{ш1}}$ $У_{ш1}=У_{ш3}$ $У_{01}=У_{02}$

В табл. 15 введены обозначения:

$$У_{шi}=\frac{Z_0}{Z_{шi}}; \qquad У_{oi}=\frac{Z_0}{Z_{oi}},$$

где Z_0— волновое сопротивление основной линии.

5.1.4. Основные электрические параметры двухшлейфного направленного ответвителя определять по следующим формулам:

— рабочее затухание C_{12}

$$C_{12}=10\lg У^2_{01}\ дБ; \qquad (102)$$

— переходное ослабление C_{13}

$$C_{13}=10\lg\left|\frac{У_{01}}{У_{ш1}}\right|^2=10\lg\left(\frac{1}{У^2_{ш1}}+1\right)\ дБ; \qquad (103)$$

— коэффициент деления мощности C_{23}

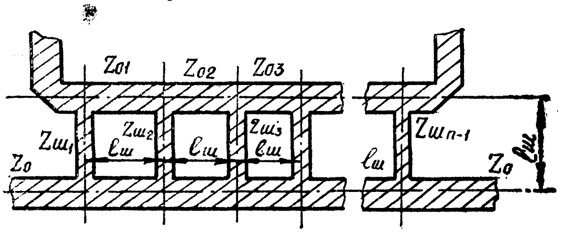
$$C_{23}=10\lg\frac{1}{У^2_{ш1}}\ дБ; \qquad (104)$$

— направленность C_{34}

$$C_{34}=20\lg\left|\sin\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{f_0}{f}-1\right)\right]\right|\ дБ, \qquad (105)$$

где f_0 — средняя частота;
f — текущее значение частоты в рабочей полосе частот ответвителя.

Топология центральной полоски шлейфного направленного ответвителя



Черт. 51

5.1.5. Основные электрические параметры трехшлейфного направленного ответвителя определять по следующим формулам:

— рабочее затухание C_{12}

$$C_{12}=10\lg\left(\frac{У^2_{ш1}+1}{У^2_{ш1}-1}\right)^2\ дБ; \qquad (106)$$

— переходное ослабление C_{13}

$$C_{13}=10\lg\left(\frac{У^2_{ш1}+1}{2У_{ш1}}\right)^2\ дБ; \qquad (107)$$

— коэффициент деления мощности C_{23}

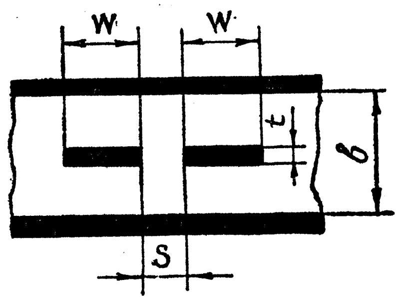
$$C_{13}=10\lg\left(\frac{У^2_{ш1}-1}{2У_{ш1}}\right)^2\ дБ. \qquad (108)$$

5.2. Направленные ответвители с распределенной электромагнитной связью на симметричных полосковых линиях

5.2.1. Поперечное сечение связанных симметричных полосковых линий приведено на черт. 52, продольное сечение центральной полоски направленного ответвителя с электромагнитной связью приведено на черт. 53.

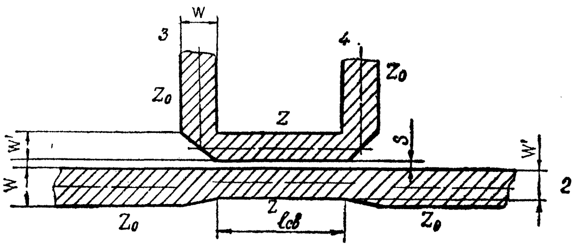
Направленные ответвители с распределенной электромагнитной связью рекомендуется использовать для получения переходного ослабления от минус 8 до минус 30 $дБ$.

Сечение поперечное связанных симметричных полосковых линий



Черт. 52

Сечение продольное направленного ответвителя с электромагнитной связью



Черт. 53

5.2.2. Коэффициент связи $K_{св}$ определять через величину переходного ослабления C_{13} по формуле

$$C_{13} = 10\lg K_{св}^{-2}\ \partial Б. \qquad (109)$$

5.2.3. Величины волновых сопротивлений четного Z_{oe} и нечетного типов Z_{oo} волн в связанной системе определять по следующим формулам:

$$Z_{oe} = Z_o\sqrt{\frac{1+K_{св}}{1-K_{св}}} \qquad (110)$$

и

$$Z_{oo} = Z_0\sqrt{\frac{1-K_{св}}{1+K_{св}}}, \qquad (111)$$

где Z_0 — волновое сопротивление основной линии.

5.2.4. Волновые сопротивления четного и нечетного типов волн следует рассчитывать через геометрические размеры участка связи по следующим формулам:

$$Z_{oe} = \frac{\dfrac{94{,}15}{\sqrt{\varepsilon_r}}}{\dfrac{W_1}{b} + \ln\dfrac{2}{\pi} + \dfrac{1}{\pi}\ln\left\{1+\operatorname{th}\left(\dfrac{\pi}{2}\cdot\dfrac{s}{b}\right)\right\}}\ Ом. \qquad (112)$$

и

$$Z_{oo} = \frac{\dfrac{94{,}15}{\sqrt{\varepsilon_r}}}{\dfrac{W_1}{b} + \ln\dfrac{2}{\pi} + \dfrac{1}{\pi}\ln\left\{1+\operatorname{cth}\left(\dfrac{\pi}{2}\cdot\dfrac{s}{b}\right)\right\}}\ Ом. \qquad (113)$$

В формулах (112) и (113) толщина центральной полоски считается бесконечно малой. Номограммы для определения $\frac{s}{b}$ и $\frac{W_1}{b}$ в функции Z_{00} и Z_{oe} приведены на черт. 54 и 55.

5.2.5. Длину области связи направленного ответвителя выбирать равной четверти длины волны в линии на средней частоте

$$l_{св} = \frac{\lambda_{до}}{4}.$$

5.2.6. Основные параметры направленного ответвителя в диапазоне частот определять по следующим формулам:

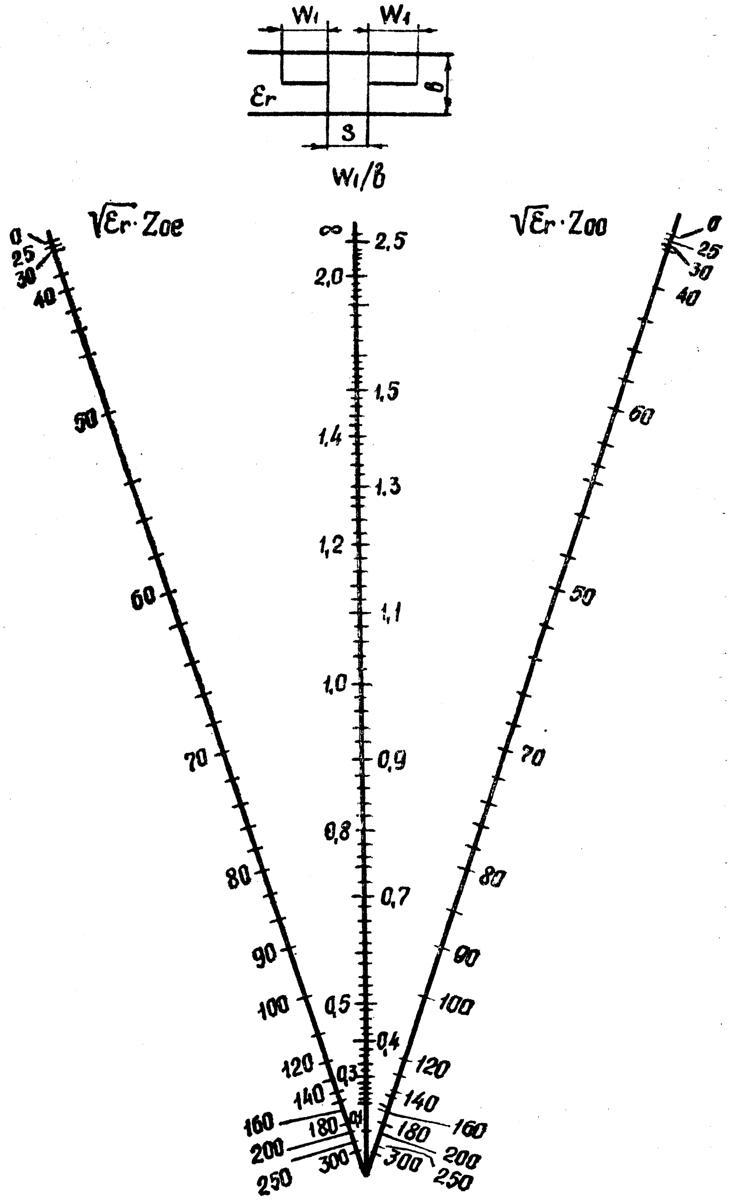
— переходное ослабление (связь) C_{13}

$$C_{13} = 10\lg\frac{1}{|S_{13}|^2} = 10\lg\frac{1}{K^2_{св}}\left[1+(1-K^2_{св})\operatorname{ctg}^2\Theta\right]\ \partial Б; \qquad (114)$$

— рабочее затухание

$$C_{12} = 10\lg\frac{1}{|S_{12}|} = 10\lg\frac{1}{1-K^2_{св}}(1-K^2_{св}\cos^2\Theta)\ \partial Б; \qquad (115)$$

Номограмма для определения геометрических размеров связанных полосковых линий



Черт. 54

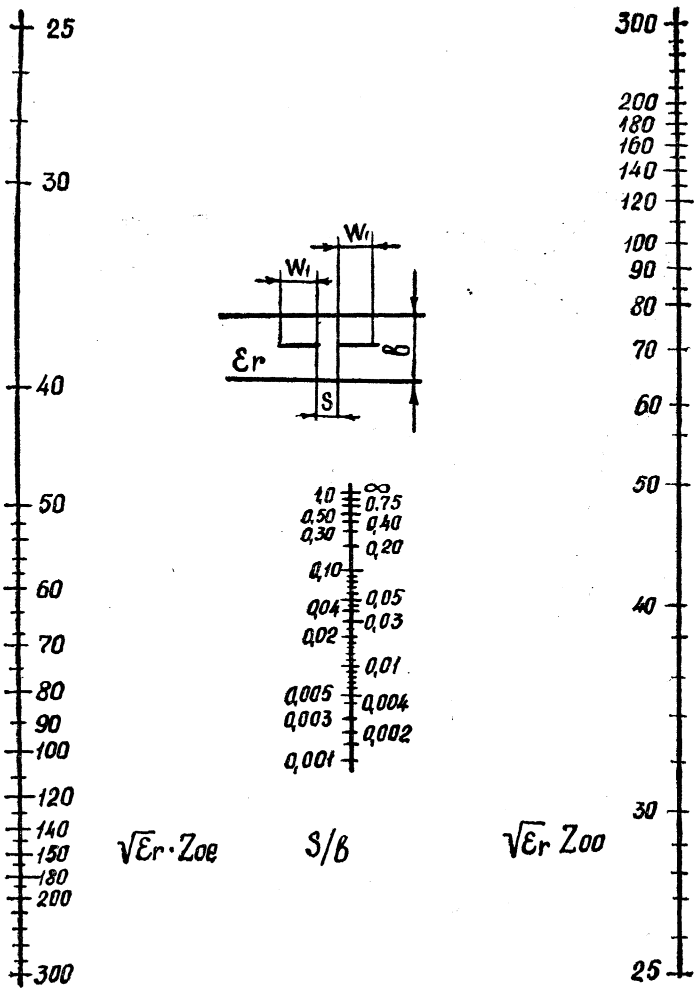
— коэффициент деления мощности

$$C_{23} = 10\lg\left|\frac{S_{12}}{S_{13}}\right|^2 = 10\lg\frac{1-K^2_{св}}{K^2_{св}\sin^2\Theta}\ \partial Б; \qquad (116)$$

где $\Theta = \frac{2\pi l_{св}}{\lambda_д}$ — электрическая длина области связи.

5.2.7. При известных комплексных коэффициентах отражения со стороны плеч Γ_2, Γ_3, Γ_4 парамет-

Номограммы для определения геометрических размеров связанных полосковых линий



Черт. 55

ры ответвителя определять по следующим формулам:

— переходное ослабление

$$C_{13}\approx 20\lg\left|\frac{1-\Gamma_3K^2_{св}+\Gamma_2(1-K^2_{св})}{K_{св}(1+\Gamma_3)}\right|\ \partial Б; \qquad (117)$$

— рабочее затухание

$$C_{12}\approx 20\lg\left|\frac{1-\Gamma_3K^2_{св}+\Gamma_2(1-K^2_{св})}{(1+\Gamma_2)\sqrt{1-K^2_{св}}}\right|\ \partial Б; \qquad (118)$$

— направленность

$$C_{34}\approx 20\lg\left|\frac{(1+\Gamma_3)(1-\Gamma_3\Gamma_4)}{(1+\Gamma_4)(\Gamma_2+\Gamma_3)\sqrt{1-K^2_{св}}}\right|\ \partial Б; \qquad (119)$$

— коэффициент стоячей волны со стороны плеча *1*

$$K_{стv}\approx\frac{1+|K^2_{св}(\Gamma_2+\Gamma_3)-\Gamma_2|}{1-|K^2_{св}(\Gamma_2+\Gamma_3)-\Gamma_2|}. \qquad (120)$$

5.3. Направленные ответвители с распределенной электромагнитной связью на связанных несимметричных полосковых линиях

5.3.1. Волновое сопротивление четного и нечетного типов волн определять по следующим формулам:

$$Z_{oe}=\frac{377}{\sqrt{\varepsilon_r}}\cdot\frac{1}{\frac{W_1}{h}+\frac{W_1}{3h\sqrt{\varepsilon_r}}+\frac{1{,}35}{\lg\frac{4h}{t}}+\frac{W_1}{3h\sqrt{\varepsilon_r}(W+s)}+\frac{1{,}35}{\left(\lg\frac{4h}{t}\right)}\cdot\left(\frac{W_1}{S}+1\right)}\frac{1}{} \qquad (121)$$

и

$$Z_{oo}=\frac{377}{\sqrt{\varepsilon_r}}\cdot\frac{1}{\frac{W_1}{h}+\frac{W_1}{3h\sqrt{\varepsilon_r}}+\frac{1{,}35}{\lg\frac{4h}{t}}+\frac{4}{3\sqrt{\varepsilon_r}}\cdot\frac{1}{\frac{s}{W_1+1}}+1{,}35/\lg\frac{4sth4h/s}{\pi t}}. \qquad (122)$$

5.3.2. Длину участка связи определять по формуле:

$$l_{св}=\frac{\lambda}{4\sqrt{\varepsilon_{эфф}}}, \qquad (123)$$

где

$$\sqrt{\varepsilon_{эфф}}=\frac{\sqrt{\varepsilon^{oe}_{эфф}}+\sqrt{\varepsilon^{oo}_{эфф}}}{2}; \qquad (124)$$

$$\varepsilon^{oe}_{эфф}=1+l^2_{oe}(\varepsilon_r-1); \qquad (125)$$

$$\varepsilon^{oo}_{эфф}=1+l^2_{oo}(\varepsilon_r-1); \qquad (126)$$

$$l_{oe}=\frac{1}{1+\frac{(C_{ppu}+C''_{ppu})\left(1-\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\right)}{2C_{oe}}}; \qquad (127)$$

$$l_{oo}=\frac{1}{1+\frac{(C_{ppu}+C'_{ppu})\left(1-\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}\right)}{2C_{oo}}}. \qquad (128)$$

Значения емкостей, входящих в формулы (125) и (126), приведены на черт. 56, 57 и рассчитываются по формулам:

$$C_{oe}=C_{pp}+\frac{1}{2}C_{ppu}+\frac{1}{2}C_F+\frac{1}{2}C''_{ppu}+\frac{1}{2}C''_F, \qquad (129)$$

где

$$C_{pp}=\frac{\varepsilon_r}{377c}\cdot\frac{W_1}{h}; \qquad (130)$$

$$C_{ppц}=\frac{2}{3}\left(\frac{\varepsilon_r}{377c}\cdot\frac{W_1}{h}\right); \qquad (131)$$

$$C_F=\frac{\varepsilon_r}{377c}\cdot\frac{2,7}{\lg\frac{4h}{t}}; \qquad (132)$$

$$C''_{ppц}=\frac{\varepsilon_r}{377c}\cdot\frac{2W_1}{3h\sqrt{\varepsilon_r}}\cdot\frac{1}{\frac{W_1}{S}+1}; \qquad (133)$$

$$C''_F=\frac{\varepsilon_r}{377c}\cdot\frac{2,7}{\lg\frac{4h}{t}}\cdot\frac{1}{\frac{W_1}{S}+1}; \qquad (134)$$

$$C_{oo}=C_{pp}+\frac{1}{2}C_{ppц}+\frac{1}{2}C_F+\frac{1}{2}C'_{ppц}+\frac{1}{2}C'_F, \qquad (135)$$

где

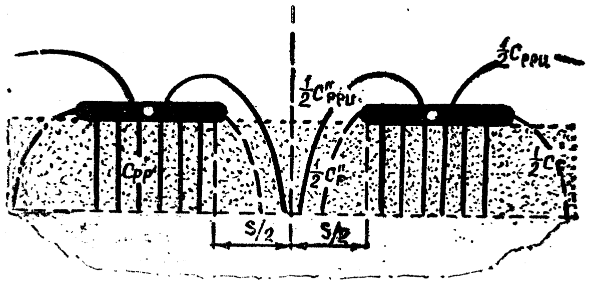
$$C'_{ppц}=\frac{\varepsilon_r}{377c}\cdot\frac{8}{3}; \qquad (136)$$

$$C'_F=\frac{\varepsilon_r}{377c}\cdot\frac{2,7}{\lg\frac{4S\,th\frac{4h}{s}}{\pi t}}, \qquad (137)$$

где с — скорость света в вакууме.

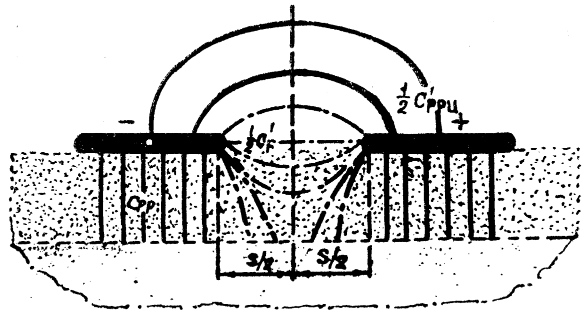
5.3.3. Распределение поля для четного и нечетного типов волн в связанной несимметричной полосковой линии приведено на черт. 56, 57.

Распределение поля для четного типа волн



Черт. 56

Распределение поля для нечетного типа волн



Черт. 57

6. РЕЗОНАТОРЫ

6.1. Резонаторы на полосковых линиях, подобно резонаторам на коаксиальных линиях, следует выполнять в виде шлейфов из короткозамкнутых или разомкнутых отрезков линий, электрические длины которых кратны четному или нечетному числу четвертей длин волн. В табл. 16 приведено восемь вариантов последовательно или параллельно включенных шлейфов для полосно-пропускающих или полосно-заграждающих (ППФ и ПЗФ) фильтров и приведены формулы для нагруженных добротностей резонаторов такого типа. Длина шлейфов $\Theta_ш$ в последнем столбце таблицы и, соответственно, в формулах для нагруженной добротности выражены в радианах.

6.2. Топология центральной полоски полуволнового резонатора, состоящего из двух разомкнутых параллельно включенных отрезков линии l_1 и l_2, приведена на черт. 58, *а*. Эквивалентная схема такого резонатора приведена на черт. 58, *б*.

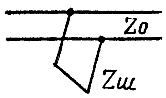
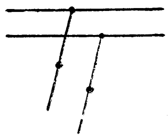
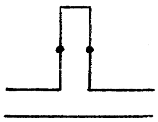
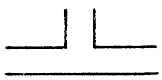
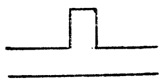
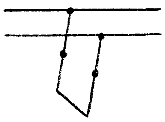
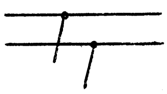
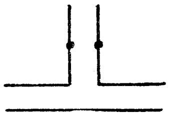
6.3. Нагруженную добротность резонатора, приведенного на черт. 58, определять по формуле

$$Q_н=\frac{\pi}{4}\cdot\frac{Z_0}{Z_ш}\frac{1}{\cos^2\frac{2\pi}{\lambda_д}l_1}, \qquad (138)$$

где Z_0 — волновое сопротивление линии;

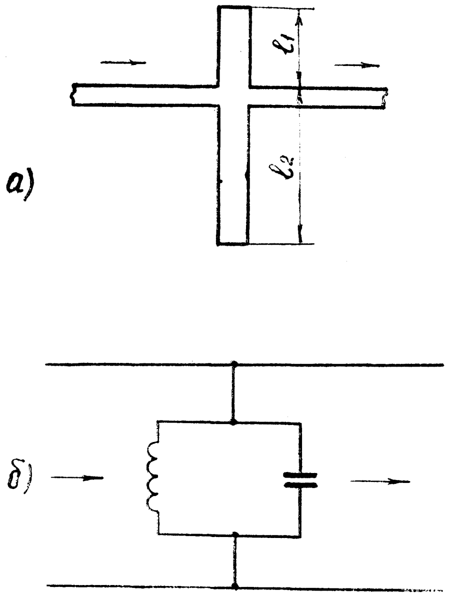
$Z_ш$ — волновое сопротивление шлейфа.

Таблица 16

Фильтр	Шлейф	Нагруженная добротность шлейфа	Длина шлейфа
ППФ		$Q=\frac{Z_0\cdot\theta_ш}{4Z_ш}\left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0}\right)^2$	$\theta_ш=\frac{\pi}{2},3\frac{\pi}{2},\ldots$
ППФ		$Q=\frac{Z_0\theta_ш}{4Z_ш}\left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0}\right)^2$	$\theta_ш=\pi,2\pi,\ldots n\pi$
ППФ		$Q=\frac{Z_ш\theta_ш}{4Z_0}\left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0}\right)^2$	$\theta_ш=\pi,2\pi,\ldots n\pi$
ППФ		$Q=\frac{Z_ш\theta_ш}{4Z_0}\left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0}\right)^2$	$\theta_ш=\frac{\pi}{2},3\frac{\pi}{2},\ldots$
ПЗФ		$Q=\frac{Y_ш}{Y_0}\theta_ш\left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0}\right)^2$	$\theta_ш=\frac{\pi}{2},3\frac{\pi}{2},\ldots$
ПЗФ		$Q=\frac{Z_ш\theta_ш}{Z_0}\left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0}\right)^2$	$\theta_ш=\pi,2\pi,\ldots n\pi$
ПЗФ		$Q=\frac{Z_ш\theta_ш}{Z_0}\left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0}\right)^2$	$\theta_ш=\frac{\pi}{2},3\frac{\pi}{2},\ldots$
ПЗФ		$Q=\frac{Y_ш\theta_ш}{Y_0}\left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0}\right)^2$	$\theta_ш=\pi,2\pi,\ldots n\pi$.

Примечание. В формулах не учтена корректировка длины за счет Т-соединения и торцовой емкости шлейфа.

Резонатор полуволновой



Черт. 58

6.4. Зависимость нагруженной добротности от $\frac{l_1}{L_p}$ при $\frac{Z_0}{Z_ш}=1$ и $\frac{Z_0}{Z_ш}=1{,}5$ приведена на черт. 59 и 60.

6.5. Для обеспечения высокой собственной добротности резонатора следует выбирать резонаторы с воздушным заполнением.

Собственную добротность такого резонатора, выполненного на симметричной линии с широкой полоской $\frac{W}{b}\geqslant 1$, определять по формуле

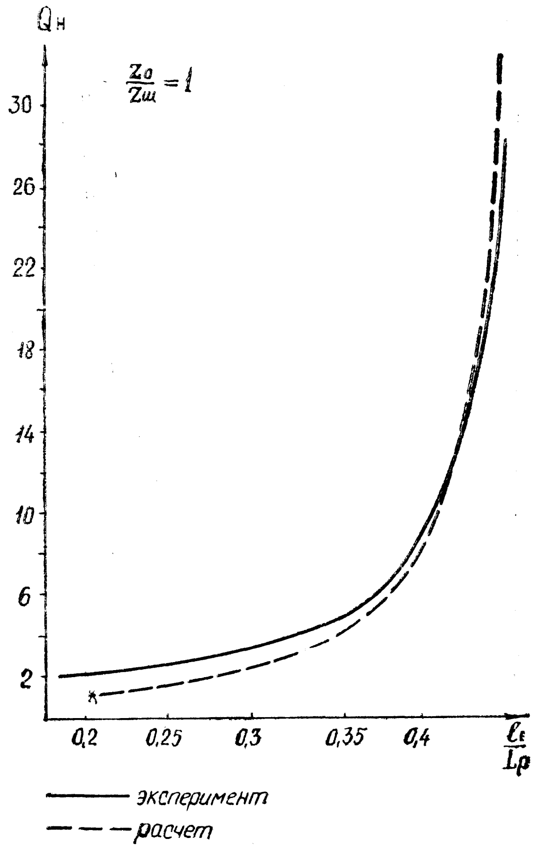
$$Q_0=3950\,\frac{f\cdot b}{R_s}\left(1-\frac{t}{b}\right)\frac{\frac{W}{b}+\frac{1}{\pi}\left\{2\ln\frac{2-\frac{t}{b}}{1-\frac{t}{b}}-\frac{t}{b}\ln\left[\left(1-\frac{t}{b}\right)^{-2}-1\right]\right\}}{2\frac{W}{b}+1-\frac{t}{b}+\frac{1}{\pi}\left(1+\frac{t}{b}\right)\ln\left(\frac{2b}{t}-1\right)}, \qquad (139)$$

где f — рабочая частота, *ГГц*;

b — высота симметричной линии, *м;*

R_s — поверхностное сопротивление, *Ом*.

Добротность нагруженная составного резонатора при $\frac{Z_0}{Z_ш}=1$



Черт. 59

Формула (139) справедлива для $\frac{t}{b}\leqslant 0{,}2$.

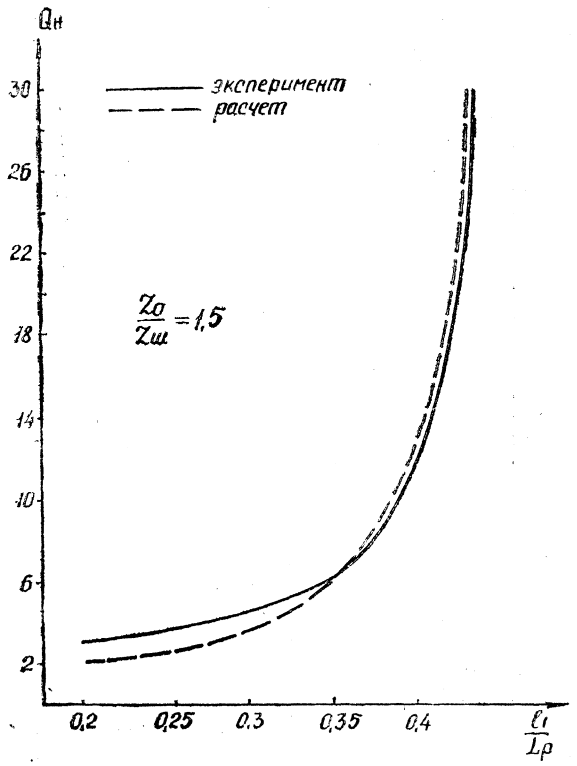
6.6. Собственную добротность резонаторов, выполненных на несимметричной полосковой линии, в случае $\frac{t}{b}\leqslant 0{,}2$ рассчитывать по формуле:

$$Q_0=7900\frac{f\cdot h}{R_s}\cdot\frac{1+\frac{W}{2h}+\frac{t}{2\pi h}\left[1+\ln\left(1+\frac{2h}{t}\right)\right]}{1+\frac{W}{2h}+\frac{t}{2\pi h}\left[1+\ln\left(1+\frac{2h}{t}\right)\right]+\frac{1}{\pi}\ln\left(1+\frac{2h}{t}\right)}. \qquad (140)$$

Формула (139) проиллюстрирована графически для трех случаев $\frac{t}{b}$ (сплошные линии). Зависимость добротности от $\frac{W}{2h}$, рассчитанная по формуле (140), показана пунктирными линиями на черт. 61.

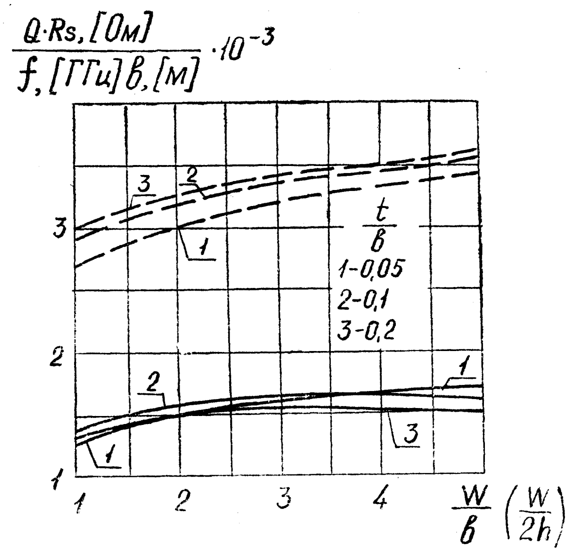
Добротность нагруженная составного резонатора

при $\frac{Z_0}{Z_ш} = 1{,}5$



Черт. 60

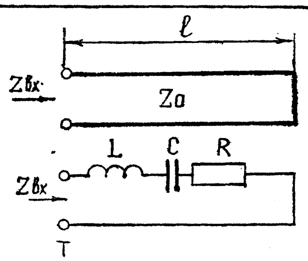
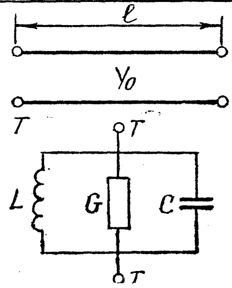
Зависимость собственной добротности полоскового резонатора от геометрических размеров



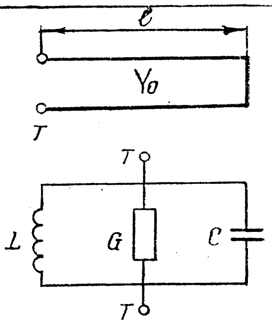
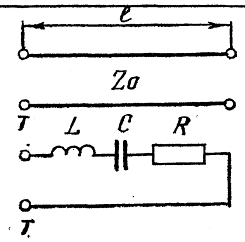
Черт. 61

6.7. Расчет собственной добротности резонаторов из короткозамкнутых или разомкнутых отрезков линий может быть произведен методом эквивалентных схем. Четыре резонатора такого типа вместе с их эквивалентными схемами на сосредоточенных параметрах приведены в табл. 17.

Таблица 17

Резонатор и его эквивалентная схема	Основные соотношения.
	$R = Z_0 \alpha_t \ell = \frac{n}{2} Z_0 \alpha_t \lambda_{g0}$; $X' = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \approx \frac{n \pi Z_0}{2} \left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0}\right)^2$; $Q = \frac{X'}{R} \approx \frac{\pi \lambda_{g0}}{\alpha_t \lambda_0^2}$; $\ell = n \frac{\lambda_{g0}}{2}$; $n = 1, 2, 3 \ldots$
	$G = Y_0 \alpha_t \ell = \frac{n}{2} Y_0 \alpha_t \lambda_{g0}$; $B' = \omega_0 C = \frac{1}{\omega_0 L} \approx \frac{n \pi Y_0}{2} \left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0}\right)^2$; $Q = \frac{B'}{G} \approx \frac{\pi \lambda_{g0}}{\alpha_t \lambda_0^2}$; $\ell = n \frac{\lambda_{g0}}{2}$, $n = 1, 2, 3 \ldots$

Продолжение табл. 17

Резонатор и его эквивалентная схема	Основные соотношения
xx 	$G = Y_0 \alpha_t l = \frac{(2n-1)}{4} Y_0 \alpha_t \lambda_{g0};$ $b' = \omega_0' C = \frac{1}{\omega_0 L} \approx \frac{(2n-1)}{4} \pi Y_0 \left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0}\right)^2;$ $Q = \frac{b'}{G} \approx \frac{\pi \lambda_{g0}}{\alpha_t \lambda_0^2}; \; l = (2n-1)\frac{\lambda_{g0}}{4},$ $n = 1, 2, 3 \ldots$
xx 	$R = Z_0 \alpha_t l = \frac{(2n-1)}{4} Z_0 \alpha_t \lambda_{g0},$ $x' = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \approx \frac{(2n-1)}{4} \pi Z_0 \left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0}\right)^2;$ $Q = \frac{x'}{R} \approx \frac{\pi \lambda_{g0}}{\alpha_t \lambda_0^2}; \; l = (2n-1)\frac{\lambda_{g0}}{4},$ $n = 1, 2, 3 \ldots$

Примечание. В табл. 17 длины резонаторов [x] кратны половине длины волны в линии, длины резонаторов [xx] кратны нечетному числу четвертей длины волн в линии.

В табл. 17 введены следующие обозначения:

α_t — общие потери в линии, *Нп/см;*

λ_{g0} — длина волны в линии на резонансной частоте;

λ_0 — резонансная длина волны в воздухе;

R, C, G, L — эквивалентные сосредоточенные параметры резонатора;

$x' = \omega_0 \frac{\partial x}{\partial \omega}\Big|_{\omega_0}$ — параметр крутизны реактивного сопротивления, *Ом*;

x — реактивная составляющая входного сопротивления;

$b' = \frac{\omega_0}{2} \cdot \frac{\partial B'}{\partial \omega}\Big|_{\omega_0}$ — параметр крутизны реактивной проводимости;

B' — реактивная составляющая входной проводимости;

Z_0 — волновое сопротивление;

Y_0 — волновая проводимость.

7. ФЕРРИТОВЫЕ Y-ЦИРКУЛЯТОРЫ

7.1. Основные уравнения

7.1.1. В сантиметровом диапазоне следует использовать устройства, работающие в дорезонансной области подмагничивающих полей. В дециметровом — следует использовать зарезонансную область подмагничивающих полей.

7.1.2. Схема Y-циркулятора приведена на черт. 62.

7.1.3. Методы расчета Y-циркуляторов обоих типов основываются на одних и тех же выражениях. Различия в методе расчета определяются тем, что при работе в дорезонансной области феррит чаще всего не насыщен. Основные уравнения для точки циркуляции имеют вид:

$$\frac{h'}{\lambda} = 0{,}00153 \frac{m}{\alpha_{\rho m}} \cdot \frac{z_0}{\mu_1} \cdot \frac{k}{\mu}; \qquad (141)$$

$$\frac{D_ф}{\lambda} = \frac{0{,}58}{\sqrt{\mu_1 \varepsilon_ф}}, \qquad (142)$$

где h' и $D_ф$ — соответственно высота и диаметр ферритовых дисков, *м*;

λ — рабочая длина волны в свободном пространстве, *м;*

Z_0 — волновое сопротивление подводящей полосковой линии, *Ом;*

$\varepsilon_ф$ — относительная диэлектрическая проницаемость феррита;

$\mu_1 = \frac{\mu^2 - k^2}{\mu}$ — относительная эффективная магнитная проницаемость феррита;

$k_п \mu$ — компоненты тензора магнитной проницаемости феррита.

Непосредственно в выражения (141) и (142) входят параметры μ_1 и отношение $\frac{k}{\mu}$, которые определяются для насыщенного феррита с помощью выражений Полдера

$$\mu_1 = 1 + \frac{P(P+\sigma_i)}{\sigma_i^2 + P\sigma_i - 1}; \qquad (143)$$

$$\frac{k}{\mu} = \frac{P}{\sigma_i^2 + P\sigma_i - 1}. \qquad (144)$$

Для ненасыщенного феррита параметры μ_1 и $\frac{k}{\mu}$ приближенно можно определить по следующим выражениям:

$$\mu_1 \cong 0{,}9 - P^2_{нен}; \quad \left|\frac{k}{\mu}\right| \cong P_{нен}, \qquad (145)$$

где $P = \frac{\mu_0 \gamma M_0}{2\pi f}$; $P_{нен} = \frac{\mu_0 \gamma M}{2\pi f}$ — относительные намагниченности насыщения и текущая намагниченность ненасыщенного феррита соответственно;

M_0, M — намагниченность насыщения и текущая намагниченность ненасыщенного феррита соответственно, *А/м;*

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная проницаемость вакуума, *Ф/м;*

$\gamma = 1{,}76 \cdot 10^{11}$ — гиромагнитное отношение, *К/кг;*

f — частота, соответствующая рабочей длине волны, *Гц;*

$\sigma_i = \frac{\mu_0 \gamma}{2\pi f} H_i$ — относительное внутреннее подмагничивающее поле;

H_i — внутреннее подмагничивающее поле, *А/м;*

m — коэффициент, приближенно учитывающий несимметричность линии;

$m = 1$ — для Y-циркулятора в несимметричном исполнении;

$m = 2$ — для Y-циркулятора в симметричном исполнении;

$\alpha_{\rho m}$ — коэффициент, учитывающий краевые поля в полосковой линии, для симметричной линии

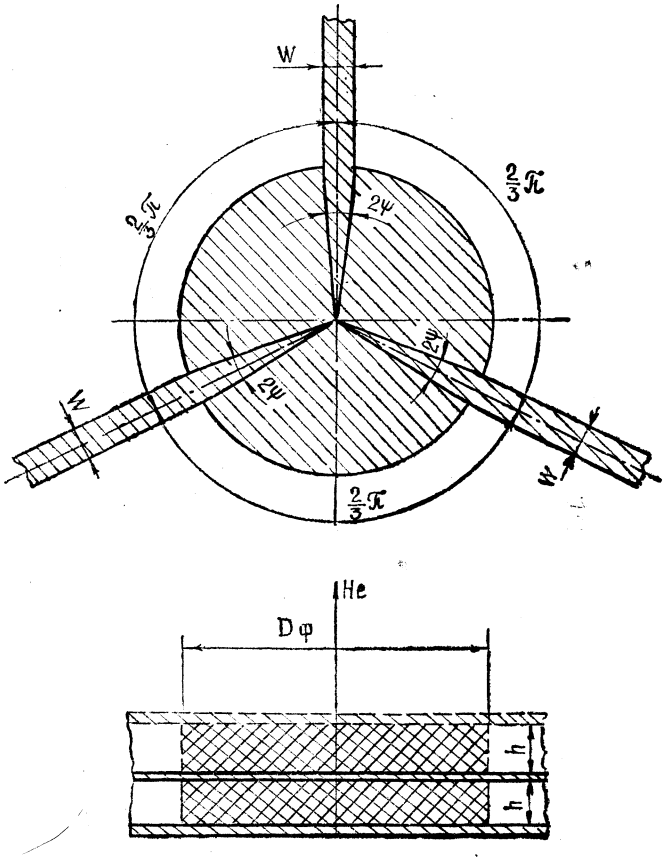
$$\alpha_{\rho m} = 1 - 0{,}00456 Z_0 \sqrt{\varepsilon_r} = \frac{1}{1 + 0{,}43\frac{2h}{W}}, \qquad (146)$$

для несимметричной линии

$$\alpha_{\rho m} = \frac{1}{1 + 1{,}735\varepsilon_r^{-0{,}0724}\left(\frac{W}{h}\right)^{-0{,}836}}, \qquad (147)$$

ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического заполнения полосковой линии.

Схема Y-циркулятора



Черт. 62

7.1.4. Расчет Y-циркуляторов может быть построен различным образом в зависимости от того, какие величины, входящие в выражения (141) и (142), взяты за исходные. Непосредственно для расчета этими выражениями можно пользоваться, если величина высоты ферритового диска не задана жестко. В этом случае целесообразно выбирать значения компонент k и μ тензора магнитной про-

ницаемости, исходя из требований получения максимальной рабочей полосы длин волн, которая пропорциональна для этих устройств отношению $\frac{k}{\mu}$. Для дорезонансной области выражения (141), (142) достаточно хорошо выполняются при $\mu_1 \geqslant 0{,}7—0{,}8$ $(\frac{k}{\mu} \leqslant 0{,}5)$. Для зарезонансной области максимальная широкополосность получается при работе возможно ближе к области ферромагнитного резонанса, однако при этом возрастает уровень вносимых потерь Y-циркулятора. Следует выбирать значения $\frac{k}{\mu}$ не более 0,2—0,3, при этом $\mu_1 \approx 2$.

7.1.5. В большинстве практических случаев высота h′ определяется высотой полосковой линии, при этом непосредственно пользоваться выражениями (141) и (142) оказывается неудобным. Для заданного значения высоты h′ расчет Y-циркулятора может быть построен следующим образом.

Заданы: рабочая длина волны λ, волновое сопротивление полосковой линии Z_0, высота h′.

Выбрать марку феррита. Для выбранной марки феррита найти значение относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_ф$ и значение намагниченности насыщения феррита M_0. При работе Y-циркулятора в дорезонансной области подмагничивающих полей для определения текущей намагниченности феррита следует пользоваться экспериментальными зависимостями $B = f(H_i)$ индукции B от подмагничивающего поля.

7.2. Методика расчета дорезонансного Y-циркулятора

7.2.1. Определить текущее значение относительной намагниченности феррита.

$$P_{нен} \cong \left|\frac{k}{\mu}\right| = \frac{1}{2A}\left[\sqrt{1+3{,}6A^2}-1\right], \qquad (148)$$

где $A = 6{,}53\, \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{1}{Z_0} \cdot \frac{\alpha_{\rho} m}{m}$.

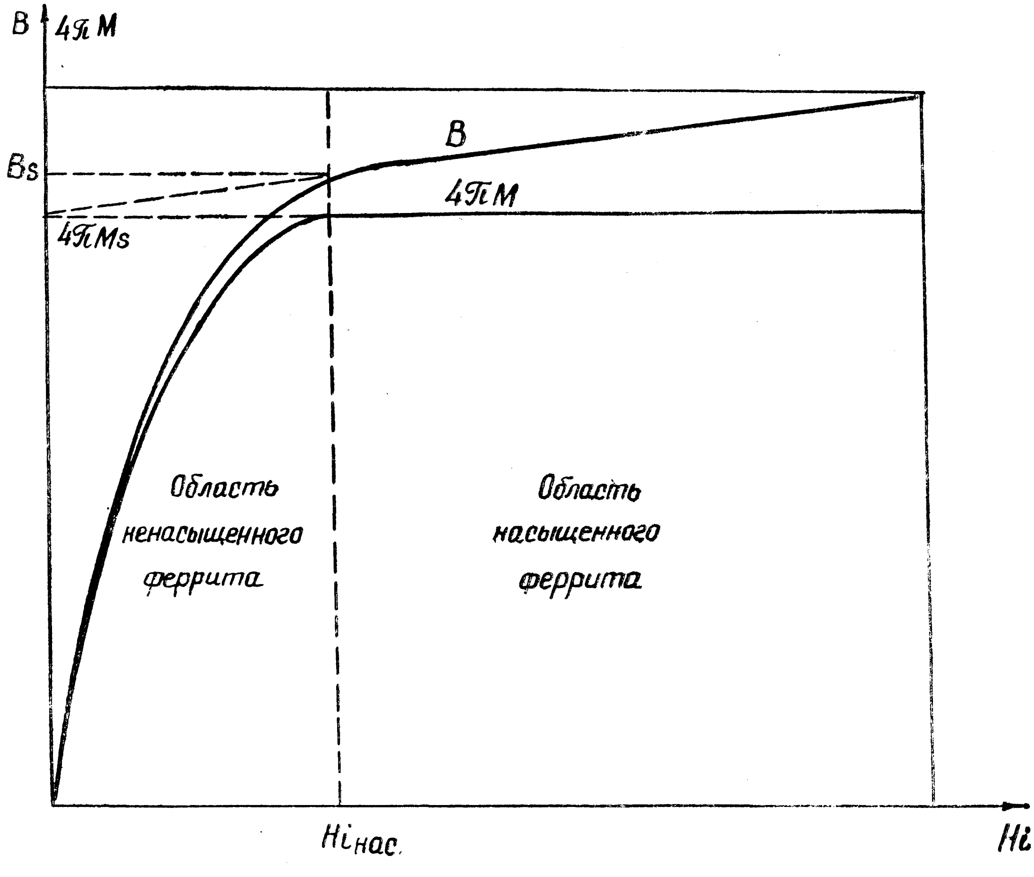
7.2.2. Определить диаметр ферритового диска

$$D_ф = 0{,}58\lambda \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_ф (0{,}9 - P^2_{нен})}}. \qquad (149)$$

7.2.3. Определить значение текущей намагниченности насыщения феррита

$$M = \frac{P_{нен} \cdot 2\pi f}{\mu_0 \cdot \gamma}. \qquad (150)$$

Зависимость магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H_i



Черт. 63

Примечание. Для перевода единиц системы СГС в единицы системы СИ следует пользоваться следующими соотношениями:

$$M_0[\text{СИ}] = 4\pi M_s[\text{СГСМ}]\cdot\frac{10^3}{4\pi};\quad H[\text{СИ}]=H[\text{СГСМ}]\cdot\frac{10^3}{4\pi};$$

$$B[\text{СИ}]=B[\text{СГСМ}]\cdot 10^{-4}.$$

7.2.4. Определить внутреннее подмагничивающее поле H_i, пользуясь экспериментальной зависимостью $B=f(H_i)$. Пример такой зависимости приведен на черт. 63.

Получить зависимость $4\pi M=f(H_i)$, вычитая из значения индукции B значение H_i в каждой точке, а затем по известному значению $4\pi M[\text{СГСМ}]=4\pi\cdot 10^{-3}M[\text{СИ}]$ определять соответствующее значение подмагничивающего поля

$$H_i[\text{СГСМ}] \text{ и } H_i[\text{СИ}]=\frac{10^3}{4\pi}H_i[\text{СГСМ}].$$

7.2.5. Определить внешнее подмагничивающее поле

$$H_e=H_i+N_zM, \qquad (151)$$

где N_z — размагничивающий фактор ферритового диска в направлении оси Z. Для тонких дисков $N_z\approx 1$.

7.3. Расчет зарезонансного Y-циркулятора

7.3.1. Определить величину P для выбранной марки феррита по формуле (145).

7.3.2. Определить величину относительного внутреннего подмагничивающего поля

$$\sigma_i=\sqrt{1+\frac{P}{A}}-P. \qquad (152)$$

Полученное значение σ_i должно быть не менее 1,4—1,6, так как в противном случае из-за близости к резонансу возрастут вносимые потери; в то же время должно выполняться условие $\sigma_i\geqslant P$, чтобы исключить потери в слабых полях. Если эти условия не выполняются, то необходимо выбирать другую марку феррита или уменьшить высоту ферритового диска h′.

7.3.3. Определить величину внутреннего подмагничивающего поля

$$H_i=\frac{2\pi\varkappa}{\gamma}\sigma_i. \qquad (153)$$

7.3.4. Определить внешнее подмагничивающее поле по формуле (151).

7.3.5. Определить величину μ_1 по формуле (143).

7.3.6. Определить диаметр ферритового диска по формуле (142).

Точность определения диаметра $D_ф$ по данному методу расчета должна быть не более 5%, подмагничивающего поля H_e 15%.

Y-циркуляторы, рассчитанные по данному методу, имеют рабочую полосу для зарезонансных устройств 3—10%, для дорезонансных устройств 5—20%. В этой полосе коэффициент стоячей волны $K_{ст}^U\leqslant 1{,}2$, развязка $P_{раз}\geqslant 20$ *дБ*. Величина вносимых потерь $P_{вн}\angle 0{,}5—1{,}0$ *дБ*.

8. ДЕЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

8.1. Т- и Y-образные делители мощности

8.1.1. Различные варианты делителей мощности, использующих Т- и Y-образные, разветвления приведены на черт. 64.

8.1.2. Для параллельного соединения (см. черт. 64, *а*) волновые сопротивления связаны соотношением:

$$\frac{1}{Z_0}=\frac{1}{Z_2}+\frac{1}{Z_3}. \qquad (154)$$

При неравном делении мощности в случае поступления энергии со стороны плеча *1* отношение мощности на выходе *3* к мощности на выходе *2* определять по формуле

$$\frac{Z_2}{Z_3}=\frac{P_3}{P_2}=m^2. \qquad (155)$$

При равном делении мощности использовать соотношение

$$Z_2=Z_3;$$

при этом $$Z_2=Z_3=2Z_0.$$

8.1.3. Прогрессивный делитель, приведенный на черт. 64, *б*, позволяет осуществить деление на любое количество каналов и получить на их выходе одинаковые величины мощности при выполнении следующих условий для каждой точки разветвления:

$$\frac{1}{Z_i}=\frac{1}{Z_{i+1}}+\frac{1}{Z_{i+2}};\ i=0,1,2,\ldots,n. \qquad (156)$$

Для делителя, приведенного на черт. 64, *б*, волновые сопротивления связаны между собой следующей системой уравнений:

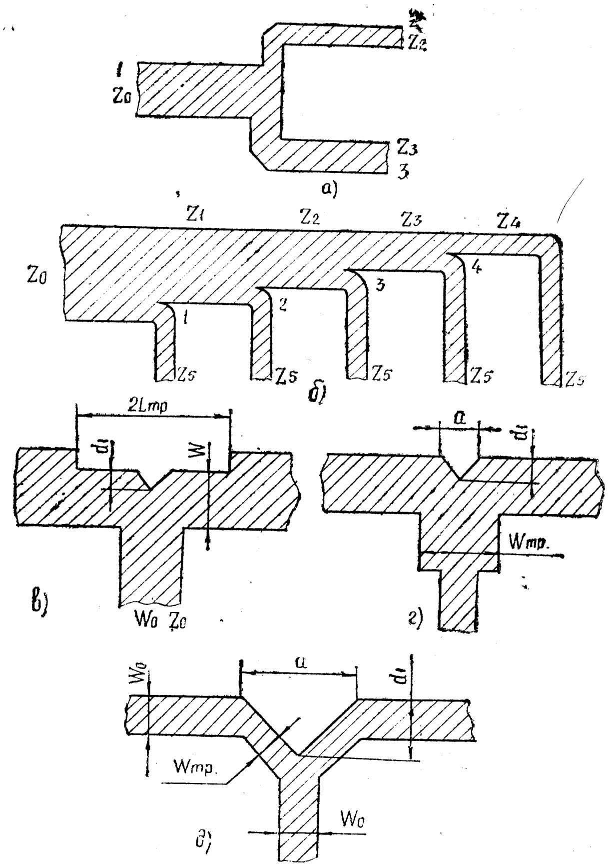
$$\frac{1}{Z_0}=\frac{1}{Z_1}+\frac{1}{Z_5};$$

$$\frac{1}{Z_1}=\frac{1}{Z_2}+\frac{1}{Z_5};$$

$$\frac{1}{Z_2}=\frac{1}{Z_3}+\frac{1}{Z_5}; \qquad (157)$$

$$\frac{1}{Z_3}=\frac{1}{Z_4}+\frac{1}{Z_5};\quad Z_4=Z_5$$

Варианты Т- и У-образных делителей мощности



Черт. 64

8.1.4. Плавные переходы имеют большие габаритные размеры, поэтому следует использовать делители мощности с четвертьволновыми трансформаторами (см. черт. 64, *в*—*д*).

8.1.5. Волновое сопротивление трансформатора $Z_{тр}$ (см. черт. 64, *в*) определить по формуле

$$Z_{тр} = Z_0\sqrt{2}. \qquad (158)$$

8.1.6. Глубину выреза d_1 (см. черт. 64, *в*) для симметричной полосковой линии с воздушным заполнением определять по формуле

$$d_{1опт} = 0{,}0625\lambda_0. \qquad (159)$$

8.1.7. В делителе (см. черт. 64, *г*) волновое сопротивление трансформатора рассчитывать по формуле

$$Z_{тр} = \frac{Z_0}{\sqrt{2}}. \qquad (160)$$

Для симметричной полосковой линии с воздушным заполнением размеры определять по следующим формулам:

$$a = 0{,}31\,\lambda_0;$$

$$W_{тр} = 1{,}62\,W_0;$$

$$L_{тр} = 0{,}21\,\lambda_0; \qquad (161)$$

$$d_1 = 0{,}15\,\lambda_0.$$

При этом обеспечивается $K_{ст U} \leqslant 1{,}1$ в полосе частот $\frac{\Delta f}{f_0} \approx 0{,}13$.

8.2. Кольцевые схемы

8.2.1. В качестве делителя мощности следует использовать кольцевую схему, общий вид которой приведен на черт. 65.

8.2.2. Проводимости соединительных отрезков определять соотношениями:

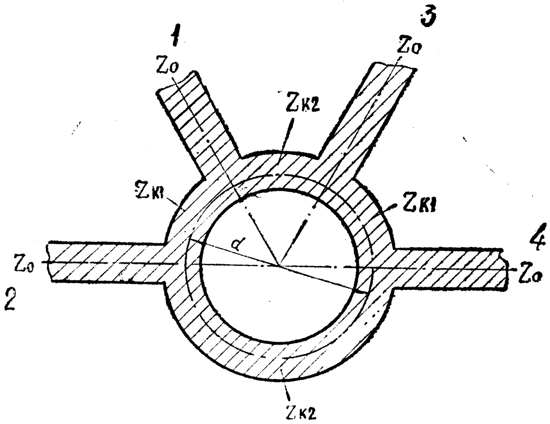
$$Y_2 = \sqrt{\frac{m^2}{m^2+1}} \qquad (162)$$

и

$$Y_1 = \sqrt{\frac{1}{m^2+1}}, \qquad (163)$$

где $m^2 = \frac{P_2}{P_3}$ — коэффициент деления при подаче мощности в плечо *1*.

Делитель мощности кольцевой



Черт. 65

8.2.3. Расстояние между осями плеч должно быть равно $\frac{\lambda_{до}}{4}$, по длинной стороне $\frac{3\lambda_{до}}{4}$.

8.2.4. Диаметр средней окружности определять по формуле

$$d_{ср} = \frac{3\lambda_{до}}{2\pi}. \qquad (164)$$

8.2.5. Волновые сопротивления отрезков определять по следующим формулам:

$$m^2 = 2 \qquad Z_{к2} = \sqrt{\frac{3}{2}}Z_0; \qquad (165)$$

$$Z_{к1} = \sqrt{3}\,Z_0;$$

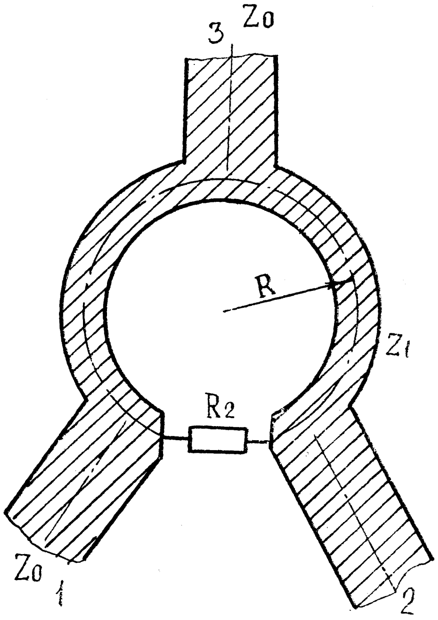
$$m^2=3 \quad \begin{matrix} Z_{к2}=\dfrac{2}{\sqrt{3}}Z_0; \\ Z_{к1}=2Z_0. \end{matrix} \qquad (166)$$

При этом не учитывается влияние неоднородностей разветвлений.

8.3. Резисторный делитель мощности

8.3.1. Общий вид резисторного делителя мощности приведен на черт. 66.

Делитель мощности резисторный



Черт. 66

8.3.2. Рабочие параметры резисторного делителя мощности определять по следующим формулам:

— согласование плеч

$$K_{стU_1}=K_{стU_2}=\frac{\sqrt{64t^4+80t^2+9}+1}{\sqrt{64t^4+80t^2+9}-1}; \qquad (167)$$

$$K_{стU_3}=\frac{\sqrt{9+8t^2}+1}{\sqrt{9+8t^2}-1}; \qquad (168)$$

— вносимое затухание

$$C_{13}=C_{23}=20\lg\frac{\sqrt{8+\cos^2\Theta}}{2}\ дБ; \qquad (169)$$

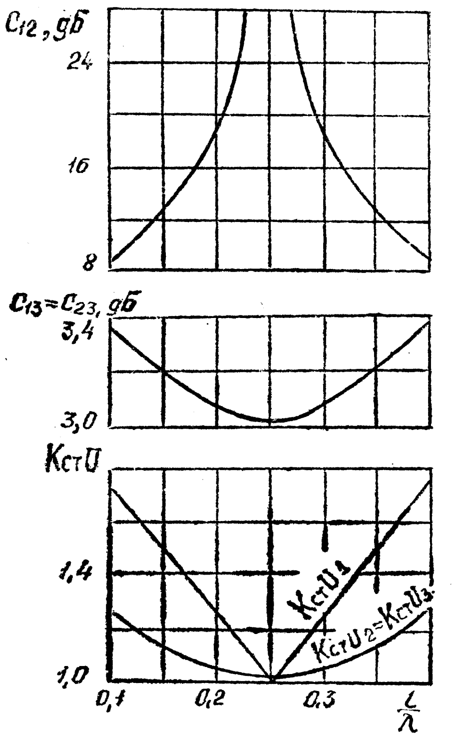
— развязка

$$C_{12}=20\lg\frac{\sqrt{64t^4+80t^2+9}}{2\sqrt{2t^2+1}}\ дБ, \qquad (170)$$

где $\Theta=\frac{2\pi l}{\lambda}$; $t=\mathrm{tg}\,\frac{2\pi l}{\lambda}$.

8.3.3. Частотные зависимости рабочих параметров резисторного делителя мощности приведены на черт. 67.

Зависимости частотные рабочих параметров резисторного делителя мощности



Черт. 67

8.3.4. Размеры резисторного делителя мощности с равным делением определять по следующим формулам:

— волновое сопротивление соединительных линий

$$Z_1=Z_0\sqrt{2}; \qquad (171)$$

— активное сопротивление нагрузки

$$R_2=2Z_0; \qquad (172)$$

— радиус кольцевого участка, образованного двумя четвертьволновыми отрезками

$$R=\frac{1}{2\pi}\cdot\frac{\lambda_0}{2\sqrt{\varepsilon_{эфф}}}. \qquad (173)$$

8.3.5. Для деления мощности на четное число каналов следует использовать комбинацию из n резисторных делителей.

8.3.6. Для расширения полосы пропускания использовать многозвенный делитель мощности, эквивалентная схема которого приведена на черт. 68.

Число звеньев n определяется по следующим формулам:

— для чебышевской частотной характеристики

$$n=\frac{\mathrm{Arch}\left(\frac{\sqrt{1-|\Gamma|^2_{max}}}{2\sqrt{2}|\Gamma|_{max}}\right)}{\mathrm{Arch}\left(\frac{1}{\sin\frac{\pi\Delta f}{4f_0}}\right)}; \qquad (174)$$

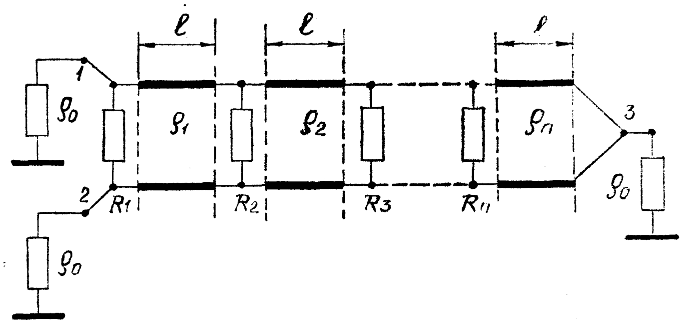
— для максимально-плоской частотной характеристики

$$n=\frac{\lg\left[\frac{2\sqrt{2}|\Gamma|_{max}}{\sqrt{1-|\Gamma|^2_{max}}}\right]}{\lg\left[\cos\frac{\pi}{2}\left(1-\frac{\Delta f}{2f_0}\right)\right]}, \qquad (175)$$

где $|\Gamma|_{max}$ — заданный допуск на рассогласование;

$\frac{\Delta f}{f_0}$ — относительная ширина полосы пропускания.

Схема n-звенного резисторного делителя мощности



Черт. 68

8.3.7. Результаты расчета рабочих параметров двух-, трех- и четырехзвенных делителей мощности с чебышевской частотной характеристикой для различных коэффициентов перекрытия диапазона частот K, где ρ_i и R_i — соответственно нормированные волновые и нагрузочные сопротивления, приведены в табл. 18.

8.3.8. Общий вид делителя с неравным делением мощности приведен на черт. 69.

8.3.9. Волновые сопротивления плеч определять по следующим формулам:

$$Z_{02}=Z_0\sqrt{m(1+m^2)};$$

$$Z_{03}=Z_0\sqrt{\frac{1+m^2}{m^3}};$$

$$Z_{04}=Z_0\sqrt{m};$$

$$Z_{05}=\frac{Z_0}{\sqrt{m}};$$

$$R=Z_0\frac{1+m^2}{m}; \qquad (176)$$

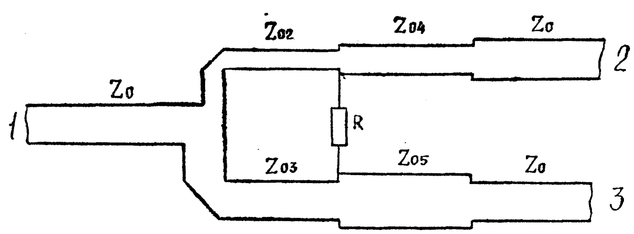
$$l=\frac{\lambda_0}{4\sqrt{\varepsilon_{эфф}}},$$

где $m^2=\frac{P_3}{P_2}$ — коэффициент деления мощности.

Таблица 18

Параметр	Число звеньев n				
	2		3		4
$K=\frac{f_2}{f_1}$	1,20	2,00	2,000	3,00	4,00
$K_{ст}U_3$	1,04	1,11	1,030	1,10	1,10
$K_{ст}U_1=K_{ст}U_2$	1,01	1,02	1,015	1,04	1,04
C_{12} *дБ*	36,60	27,30	38,700	27,90	26,80
ρ_1	1,20	1,22	1,110	1,15	1,12
ρ_2	1,67	1,64	1,410	1,41	1,30
ρ_3	—	—	1,800	1,74	1,54
ρ_4	—	—	—	—	1,78
R_1	5,32	4,82	10,000	8,00	9,60
R_2	1,86	1,96	3,750	4,23	5,80
R_3	—	—	1,900	2,14	3,45
R_4	—	—	—	—	2,06

Делитель с неравным делением мощности



Черт. 69

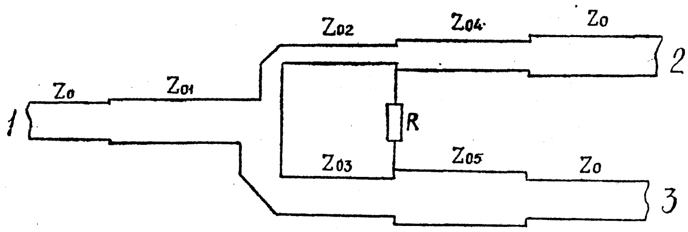
8.3.10. Значения нормированных волновых сопротивлений в зависимости от перепада мощности на выходе приведены в табл. 19.

8.3.11. Для увеличения полосы пропускания и улучшения $K_{ст}U$ применять схему, представленную на черт. 70.

Таблица 19

Перепад мощности, дБ	$\frac{Z_{02}}{Z_0}$	$\frac{Z_{03}}{Z_0}$	$\frac{Z_{04}}{Z_0}$	$\frac{Z_{05}}{Z_0}$	$\frac{R}{Z_0}$
0,0	1,414	1,414	1,000	1,000	2,000
0,1	1,398	1,431	0,994	1,006	2,000
0,5	1,336	1,499	0,972	1,029	2,003
1,0	1,265	1,592	0,944	1,059	2,013
2,0	1,138	1,804	0,891	1,122	2,053
3,0	1,031	2,057	0,841	1,189	2,120
5,0	0,860	2,721	0,750	1,334	2,341

Делитель с неравным делением мощности с улучшенными характеристиками



Черт. 70

8.3.12. Значения волновых сопротивлений плеч определять по формулам:

$$Z_{01}=\left(\frac{m}{1+m^2}\right)^{\frac{1}{4}} Z_o;$$

$$Z_{02}=(m^{\frac{3}{4}})\cdot(1+m^2)^{\frac{1}{4}} Z_o;$$

$$Z_{03}=\left[\frac{(1+m^2)^{\frac{1}{4}}}{(m^{\frac{5}{4}})}\right]Z_0 \qquad (177)$$

$$Z_{04}=\sqrt{m}Z_o;$$

$$Z_{05}=\frac{Z_0}{\sqrt{m}};$$

$$R=Z_o\left[\frac{1+m^2}{m}\right].$$

9. СОГЛАСОВАННЫЕ НАГРУЗКИ

9.1. В качестве оконечных нагрузок следует использовать пластины из поглощающих материалов. Объемные и пленочные нагрузки характеризуются удельным ослаблением $\alpha_{уд}$ (ослаблением на единицу длины). Так как величина удельного ослабления зависит от частоты, то $\alpha_{уд}$ следует определять экспериментально.

9.2. Общий вид объемной нагрузки приведен на черт. 71.

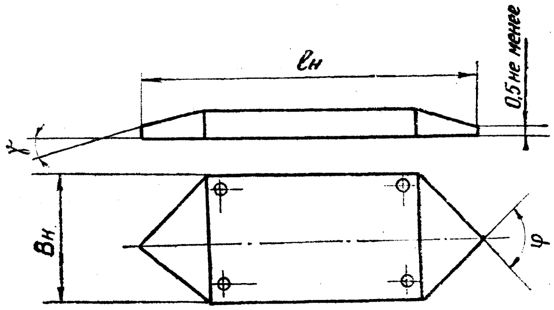
9.3. Длину поглощающей нагрузки следует выбирать, исходя из заданного ослабления

$$l\cong\frac{\alpha_з}{\alpha_{уд}}, \qquad (178)$$

где $\alpha_з$ — заданное ослабление.

Рекомендуется $l_н$ выбирать равной $\lambda_д$.

Нагрузка поглощающая



Черт. 71

9.4. Ширину пластины определять по формуле

$$B_н\geqslant W+2b. \qquad (179)$$

Для согласования объемных и пленочных нагрузок следует выбирать углы скоса (черт. 71) в пределах следующих значений

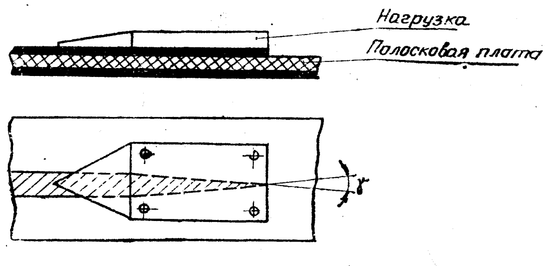
$$\varphi=30—60°,$$

$$\gamma=5—7°.$$

9.5. Расположение объемных согласованных нагрузок в несимметричной и симметричной линиях приведено на черт. 72—74.

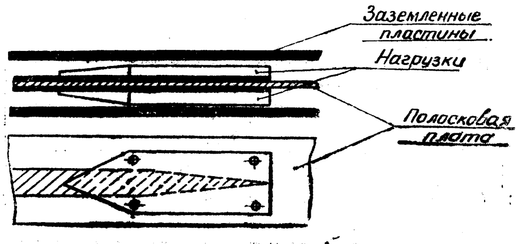
9.6. Необходимо обеспечить короткое замыкание полосковой линии в конце оконечной нагрузки.

Нагрузка оконечная в несимметричной полосковой линии



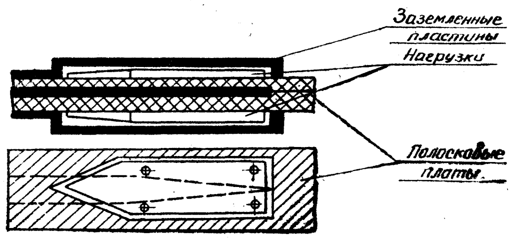
Черт. 72

Нагрузка оконечная в воздушно-полосковой симметричной линии



Черт. 73

Нагрузка оконечная в симметричной полосковой линии



Черт. 74

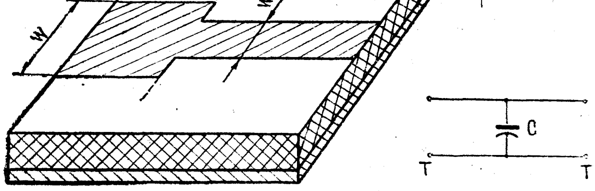
10. НЕОДНОРОДНОСТИ В ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ

10.1. Скачок по ширине полоски в несимметричной полосковой линии

10.1.1. Скачок по ширине полоски несимметричной полосковой линии показан на черт. 75.

10.1.2. Эквивалентная схема неоднородности, приведенная на черт. 75, *б*, состоит из параллельной емкости С. На черт. 76 приведены графики зависимости емкости скачка в функции $\frac{W'}{W}$ в интервале (0,4—1,0) $\frac{W_1}{W}$ для нескольких значений $\frac{W}{h}$ и диэлектрической постоянной ε_r.

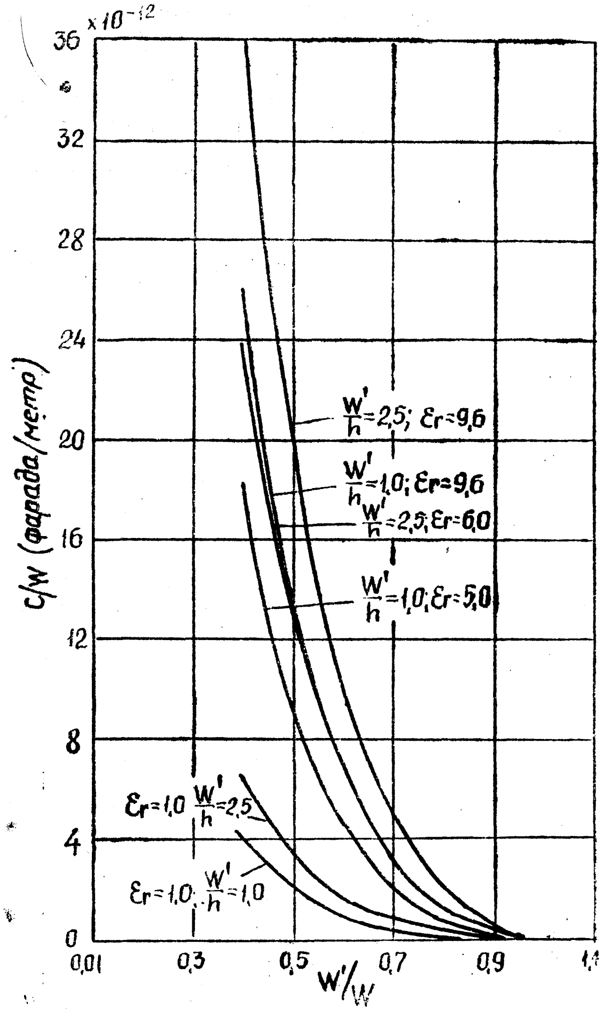
Скачок по ширине полоски в несимметричной полосковой линии



а) б)

Черт. 75

Зависимость емкости скачка ширины полоски в несимметричной полосковой линии

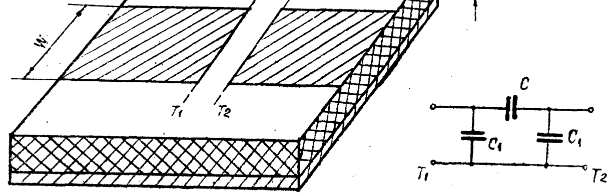


Черт. 76

10.2. Разрыв емкостной полоски в несимметричной полосковой линии

10.2.1. Разрыв емкостной полоски в несимметричной полосковой линии приведен на черт. 77.

Разрыв емкостной



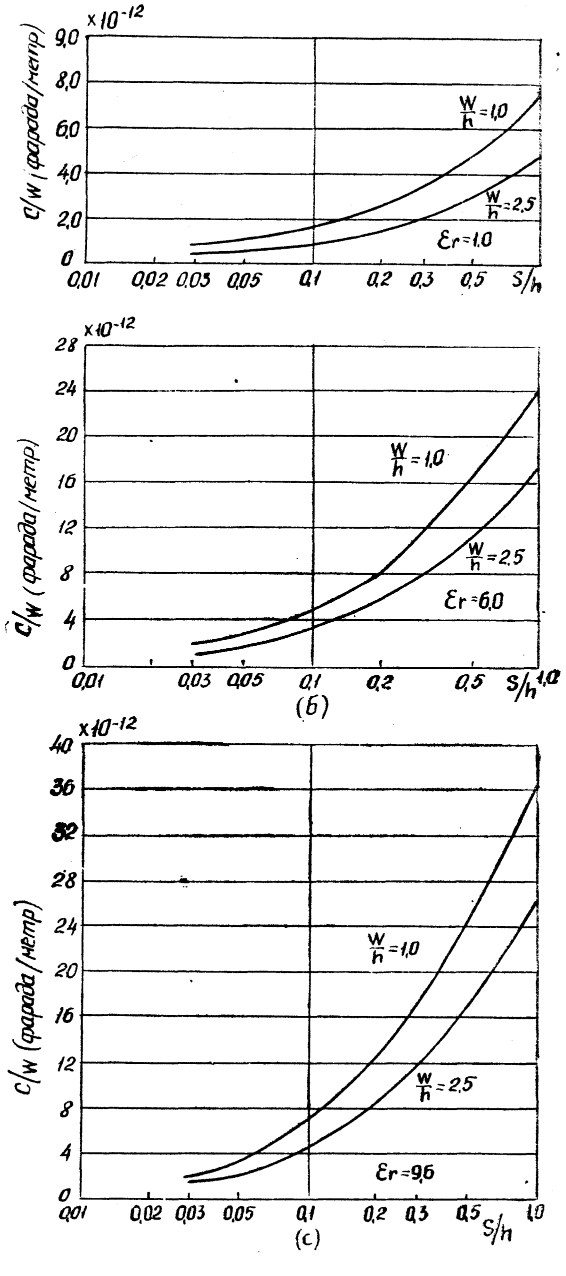
а) б)

Черт. 77

10.2.2. Эквивалентная цепь неоднородности такого вида представляет собой П — образное звено, состоящее из последовательной и двух параллельных емкостей. На черт. 78 приведена графическая зависимость параллельной емкости C_1 от параметра $\frac{s}{h}$ для двух значений $\frac{W}{h}$ и трех значений ε_r.

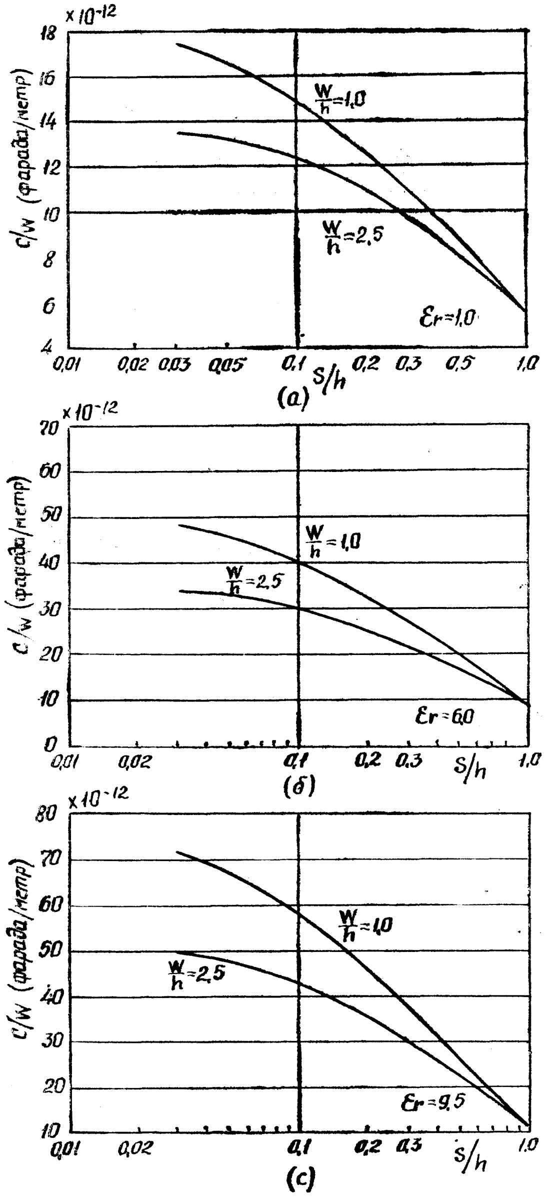
10.2.3. Зависимость последовательной емкости С от параметра $\frac{s}{h}$ для фиксированных величин $\frac{W}{h}$ и ε_r приведена на черт. 79.

Зависимость параллельной емкости С от параметра S/h



Черт. 78

Зависимость последовательной емкости С от параметра S/h



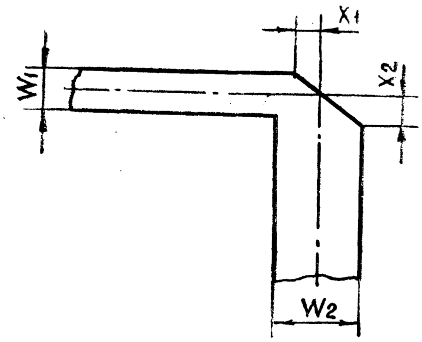
Черт. 79

10.3. Поворот полоски на угол 90° в несимметричной полосковой линии

10.3.1. Поворот полоски на 90° в несимметричной полосковой линии приведен на черт. 80 при одновременном изменении ширины полоски в несимметричной полосковой линии. Компенсация реактивности неоднородности такого вида происходит за счет соответствующего выбора скоса. Параметры скосов X_1 и X_2 рассчитывать по следующим формулам:

$$X_1 = 0{,}565W_1 \quad \text{и} \quad X_2 = 0{,}565W_2 \qquad (180)$$

Поворот центральной полоски



Черт. 80

10.4. Емкостный разрыв центральной полоски симметричной полосковой линии

10.4.1. Разрыв центральной полоски симметричной полосковой линии показан на черт. 81.

10.4.2. Последовательную емкостную проводимость следует рассчитывать по формуле:

$$B_1 = \frac{b}{\lambda_д} \ln \left\{ \operatorname{cth} \left(\frac{\pi s}{2b} \right) \right\}. \qquad (181)$$

Параллельную реактивную проводимость рассчитывать по формуле:

$$B_2 = -\frac{2b}{\lambda_д} \ln \left\{ \operatorname{ch} \left(\frac{\pi s}{2b} \right) \right\}. \qquad (182)$$

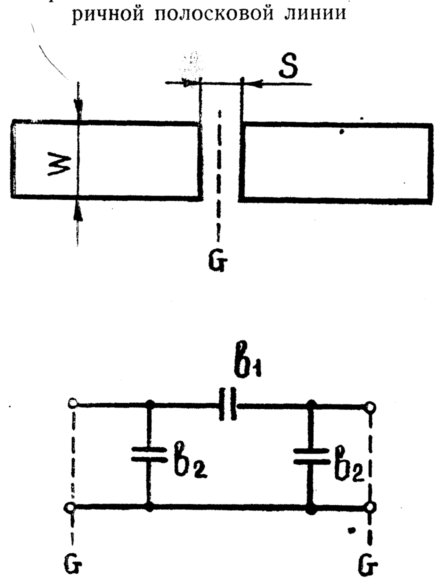
Формула (181) справедлива при выполнении следующих условий:

$$\frac{t}{b} < 1; \quad \frac{W}{b} > 0{,}5 \text{ и } \frac{\;}{b} < 0{,}1.$$

Формула (182) справедлива при выполнении следующих условий:

$$\frac{t}{b} > 0{,}5 \text{ и } \frac{W}{b} > 0{,}5.$$

Разрыв емкостный полоски симметричной полосковой линии



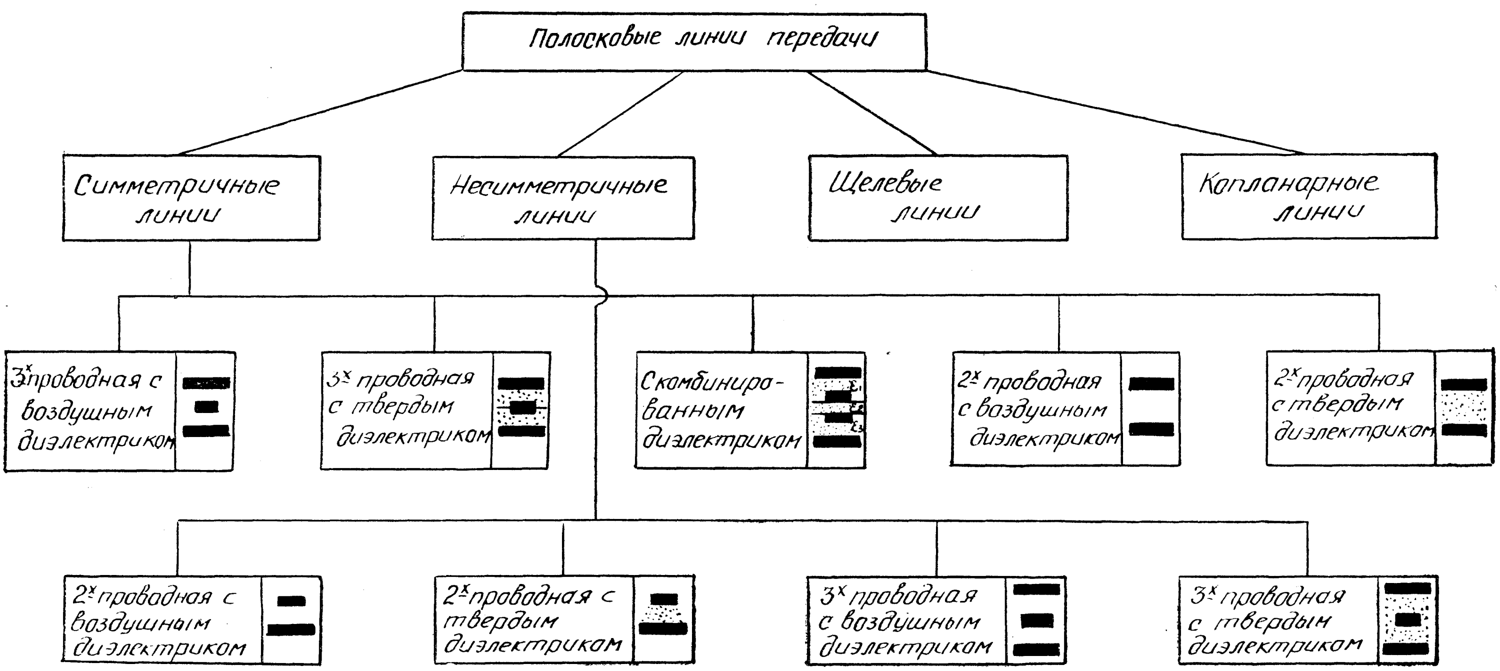
Черт. 81

11. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ

11.1. Классификационная схема полосковых линий передачи приведена на черт. 82.

11.2. Выбор типа полосковых линий производить на основе исходных технических требований, предъявляемых к аппаратуре.

Классификация полосковых линий



Черт. 82

Приложение

Таблица 1

Параметры элементов фильтров-прототипов с максимально плоской характеристикой
$b_п = 3{,}0$ $\partial Б$; $(|\Gamma|_{макс} = 0{,}71)$

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	1,412443	1,412443	—	—	—	—	—	—	—	—
3	0,999165	1,998330	0,999165	—	—	—	—	—	—	—
4	0,764888	1,846602	1,846602	0,764888	—	—	—	—	—	—
5	0,617725	1,617224	1,998999	1,617224	0,617725	—	—	—	—	—
6	0,517422	1,413624	1,931045	1,931045	1,413624	0,517422	—	—	—	—
7	0,444883	1,246534	1,801293	1,999284	1,801293	1,246534	0,444883	—	—	—
8	0,390059	1,110793	1,662419	1,960957	1,960957	1,662419	1,110793	0,390059	—	—
9	0,347200	0,999722	1,531663	1,878863	1,999444	1,878863	1,531663	0,999722	0,347200	—
10	0,312791	0,907754	1,413859	1,781567	1,974882	1,974882	1,781567	1,413859	0,907754	0,312791
11	0,284565	0,830641	1,309424	1,682124	1,918549	1,999545	1,918549	1,682124	1,309424	0,830641
12	0,260998	0,765207	1,217269	1,586376	1,847374	1,982477	1,982477	1,847374	1,586376	1,217269
13	0,241027	0,709073	1,135910	1,496733	1,770571	1,941509	1,999615	1,941509	1,770571	1,496733
14	0,223889	0,660440	1,063874	1,413961	1,693145	1,887429	1,987069	1,987069	1,887429	1,693145
15	0,209022	0,617931	0,999833	1,338038	1,617764	1,826786	1,955969	1,999666	1,955969	1,826786
16	0,196004	0,580479	0,942646	1,268588	1,545779	1,763567	1,913581	1,990058	1,990058	1,913581
17	0,184509	0,547245	0,891345	1,205092	1,477800	1,700184	1,864669	1,965656	1,999705	1,965656
18	0,174287	0,517566	0,845119	1,146993	1,414017	1,638077	1,812364	1,931584	1,992113	1,992113
19	0,165137	0,490906	0,803285	1,093752	1,354385	1,578073	1,758716	1,891385	1,972463	1,999737
20	0,156899	0,466832	0,765271	1,044867	1,298734	1,520622	1,705067	1,847528	1,944497	1,993585

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	0,284565	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	0,765207	0,260998	—	—	—	—	—	—	—	—
13	1,135910	0,709073	0,241027	—	—	—	—	—	—	—
14	1,413961	1,063874	0,660440	0,223889	—	—	—	—	—	—
15	1,617764	1,338038	0,999833	0,617931	0,209022	—	—	—	—	—
16	1,763567	1,545779	1,268588	0,942646	0,580479	0,196004	—	—	—	—
17	1,864669	1,700184	1,477800	1,205092	0,891345	0,547245	0,184509	—	—	—
18	1,931584	1,812364	1,638077	1,414017	1,146993	0,845119	0,517566	0,174287	—	—
19	1,972463	1,891385	1,758716	1,578073	1,354385	1,093752	0,803285	0,490906	0,165137	—
20	1,993585	1,944497	1,847528	1,705067	1,520622	1,298734	1,044867	0,765271	0,466832	0,156899

Таблица 2

Параметры элементов фильтров-прототипов с чебышевской характеристикой

$b_п = 0{,}01$ *дБ*; $(|\Gamma|_{макс} = 0{,}05)$; $1/r = 1{,}100751$

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	0,448891	0,407804	—	—	—	—	—	—	—	—
3	0,629191	0,970292	0,629191	—	—	—	—	—	—	—
4	0,712878	1,200358	1,321296	0,647628	—	—	—	—	—	—
5	0,756342	1,304925	1,577317	1,304925	0,756342	—	—	—	—	—
6	0,781361	1,360015	1,689684	1,535028	1,497039	0,709842	—	—	—	—
7	0,796955	1,392427	1,748143	1,633131	1,748143	1,392427	0,796955	—	—	—
8	0,807288	1,413085	1,782449	1,683340	1,852940	1,619302	1,555455	0,733396	—	—
9	0,814472	1,427062	1,804368	1,712542	1,905798	1,712542	1,804368	1,427062	0,814472	—
10	0,819660	1,436960	1,819268	1,731116	1,936240	1,759016	1,905529	1,652751	1,581736	0,744635
11	0,823526	1,444229	1,829884	1,743723	1,955480	1,785545	1,955480	1,743723	1,829884	1,444229
12	0,826482	1,449726	1,837729	1,752707	1,968487	1,802202	1,983777	1,788312	1,929295	1,669522
13	0,828792	1,453984	1,843699	1,759355	1,977734	1,813409	2,001437	1,813409	1,977734	1,759355
14	0,830630	1,457350	1,848354	1,764425	1,984570	1,821351	2,013263	1,828989	2,004855	1,802923
15	0,832117	1,460058	1,852055	1,768387	1,989782	1,827209	2,021614	1,849378	2,021614	1,827209
16	0,833337	1,462269	1,855050	1,771547	1,993856	1,831669	2,027756	1,846687	2,032744	1,842156
17	0,834349	1,464097	1,857508	1,774110	1,997109	1,835153	2,032424	1,852049	2,040549	1,852049
18	0,835199	1,465627	1,859551	1,776221	1,999750	1,837933	2,036065	1,856114	2,046259	1,858965
19	0,835919	1,466919	1,861269	1,777980	2,001927	1,840191	2,038968	1,859279	2,050578	1,864011
20	0,836535	1,468022	1,862726	1,779463	2,003745	1,842053	2,041324	1,861800	2,053935	1,867820

$b_п = 0{,}01$ *дБ*; $(|\Gamma|_{макс} = 0{,}05)$; $1/r = 1{,}100751$

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	0,823526	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	1,595788	0,750833	—	—	—	—	—	—	—	—
13	1,843699	1,453984	0,828792	—	—	—	—	—	—	—
14	1,942194	1,679174	1,604180	0,754601	—	—	—	—	—	—
15	1,989782	1,768387	1,852055	1,460058	0,832117	—	—	—	—	—
16	2,016212	1,811359	1,950033	1,685257	1,609594	0,757060	—	—	—	—
17	2,032424	1,835153	1,997109	1,774110	1,857508	1,464097	0,834349	—	—	—
18	2,043120	1,849704	2,023107	1,816713	1,955178	1,689346	1,613290	0,758751	—	—
19	2,050578	1,859279	2,038968	1,840191	2,001927	1,777980	1,861269	1,466919	0,835919	—
20	2,056006	1,865939	2,049379	1,854482	2,027642	1,820343	1,958746	1,692231	1,615927	0,759964

Продолжение табл. 2

$b_п = 0,1\ \partial Б$; $(|\Gamma|_{макс} = 0,15)$; $1/r = 1,355382$

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	0,843069	0,622015	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,031585	1,147400	1,031585	—	—	—	—	—	—	—
4	1,108813	1,306183	1,770378	0,818080	—	—	—	—	—	—
5	1,146838	1,371210	1,975027	1,371210	1,146838	—	—	—	—	—
6	1,168135	1,403967	2,056235	1,517088	1,902913	0,861848	—	—	—	—
7	1,181203	1,422802	2,096694	1,573393	2,096694	1,422802	1,181203	—	—	—
8	1,189776	1,434649	2,119920	1,601002	2,169969	1,564075	1,944497	0,877815	—	—
9	1,195696	1,442596	2,134573	1,616713	2,205390	1,616713	2,134573	1,442596	1,195696	—
10	1,199953	1,448193	2,144455	1,626584	2,225352	1,641863	2,204643	1,582777	1,962855	0,885323
11	1,203113	1,452287	2,151459	1,633231	2,237814	1,655912	2,237814	1,633231	2,151459	1,452287
12	1,205524	1,455374	2,156616	1,637944	2,246173	1,664625	2,256204	1,657224	2,220040	1,591149
13	1,207403	1,457760	2,160529	1,641419	2,252086	1,670443	2,267541	1,670443	2,252086	1,641419
14	1,208893	1,459643	2,163574	1,644062	2,266442	1,674534	2,275076	1,678549	2,269649	1,664801
15	1,210104	1,461156	2,165992	1,646123	2,259754	1,677559	2,280369	1,683912	2,280369	1,677559
16	1,211093	1,463390	2,167945	1,647764	2,262338	1,679849	2,284248	1,687666	2,287434	1,685316
17	1,211914	1,463409	2,169547	1,649094	2,264398	1,681634	2,287189	1,690411	2,292364	1,690411
18	1,212602	1,464261	2,170878	1,650189	2,266069	1,683056	2,289478	1,692486	2,295957	1,693955
19	1,213184	1,464981	2,171995	1,651100	2,267445	1,684209	2,291301	1,694099	2,298668	1,696532
20	1,213682	1,465594	2,172944	1,651867	2,268593	1,685160	2,292779	1,695382	2,300772	1,698472

$b_п = 0,1\ \partial Б$; $(|\Gamma|_{макс} = 0,15)$; $1/r = 1,355382$

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1,203113	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	1,972588	0,889433	—	—	—	—	—	—	—	—
13	2,160529	1,646123	1,207403	—	—	—	—	—	—	—
14	2,228332	1,596283	1,978374	0,891922	—	—	—	—	—	—
15	2,559754	1,457760	2,165992	1,461156	1,210104	—	—	—	—	—
16	2,276838	1,669151	2,233351	1,599508	1,982097	0,893542	—	—	—	—
17	2,287189	1,681634	2,264398	1,649094	2,169547	1,463409	1,211914	—	—	—
18	2,293966	1,689175	2,281184	1,671904	2,236637	1,601671	1,984634	0,894654	—	—
19	2,298668	1,694099	2,291301	1,684209	2,267445	1,651100	2,171995	1,401981	1,213184	—
20	2,302079	1,697508	2,297891	1,691610	2,284037	1,673766	2,238912	1,603195	1,986441	0,895451

Продолжение табл. 2

$b_п = 0,2$ $дБ$; $(|\Gamma|_{макс} = 0,21)$; $1/r = 1,538586$

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	1,037869	0,674560	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,227578	1,152541	1,227578	—	—	—	—	—	—	—
4	1,302876	1,284424	1,976199	0,846800	—	—	—	—	—	—
5	1,339477	1,337008	2,166086	1,337008	1,339477	—	—	—	—	—
6	1,359845	1,363210	2,239498	1,455555	2,097417	0,883827	—	—	—	—
7	1,372295	1,378193	2,275688	1,500146	2,275688	1,378193	1,372295	—	—	—
8	1,380445	1,387588	2,296355	1,521784	2,341398	1,492509	2,134924	0,897215	—	—
9	1,386064	1,393878	2,309355	1,534034	2,372831	1,534034	2,309355	1,393878	1,386064	—
10	1,390099	1,398302	2,318106	1,541707	2,390455	1,553669	2,372050	1,506646	2,151409	0,903490
11	1,393093	1,401535	2,324300	1,546865	2,401425	1,564581	2,401425	1,546865	2,324300	1,401535
12	1,395376	1,403972	2,328857	1,550518	2,408770	1,571329	2,417627	1,565573	2,385606	1,513634
13	1,397154	1,405854	2,332314	1,553209	2,413959	1,575827	2,427586	1,575827	2,413959	1,553209
14	1,398568	1,407339	2,335001	1,555254	2,417779	1,578994	2,434193	1,582096	2,429419	1,571428
15	1,399709	1,408531	2,337135	1,556849	2,420682	1,581320	2,438828	1,586237	2,438828	1,581320
16	1,400644	1,409503	2,338858	1,558118	2,422946	1,583085	2,442224	1,589132	2,445019	1,587316
17	1,401420	1,410306	2,340271	1,559146	2,424750	1,584460	2,444795	1,591247	2,449333	1,591247
18	1,402070	1,410978	2,341444	1,559992	2,426213	1,585556	2,446797	1,592846	2,452474	1,593979
19	1,402620	1,411544	2,342429	1,560696	2,427417	1,586445	2,448390	1,594087	2,454844	1,595963
20	1,403091	1,412028	2,343265	1,561289	2,428422	1,587177	2,449681	1,595074	2,456682	1,597456

$b_п = 0,2$ $дБ$; $(|\Gamma|_{макс} = 0,21)$; $1/r = 1,538586$

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1,393093	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	2,160132	0,906919	—	—	—	—	—	—	—	—
13	2,332314	1,405854	1,397154	—	—	—	—	—	—	—
14	2,392893	1,517627	2,165312	0,908993	—	—	—	—	—	—
15	2,420682	1,556849	2,337135	1,408531	1,399709	—	—	—	—	—
16	2,435714	1,574787	2,397300	1,520134	2,168642	0,910343	—	—	—	—
17	2,444795	1,584460	2,424750	1,559146	2,340271	1,410306	1,401420	—	—	—
18	2,450731	1,590289	2,439516	1,576910	2,400183	1,521814	2,170911	0,911269	—	—
19	2,454844	1,594087	2,448390	1,586445	2,427417	1,560696	2,342429	1,411544	1,402620	—
20	2,457825	1,596713	2,454160	1,592163	2,442010	1,578345	2,402179	1,522998	2,172527	0,911932

Продолжение табл. 2

$b_п = 0,3$ *дБ*; ($|Г|_{макс} = 0,26$); $1/r = 1,696744$

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	1,180460	0,695721	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,371261	1,137842	1,371261	—	—	—	—	—	—	—
4	1,446726	1,253682	2,127177	0,852059	—	—	—	—	—	—
5	1,481677	1,299208	2,309514	1,299208	1,481677	—	—	—	—	—
6	1,601615	1,321762	2,379027	1,402113	2,242691	0,884998	—	—	—	—
7	1,513780	1,334623	2,413104	1,440289	2,413104	1,334623	1,513780	—	—	—
8	1,527732	1,342674	2,432512	1,458711	2,475059	1,433635	2,278173	0,896854	—	—
9	1,527210	1,348059	2,444700	1,469113	2,504534	1,469113	2,444700	1,348059	1,527210	—
10	1,531144	1,351844	2,452897	1,475618	2,521016	1,485796	2,503745	1,445650	2,293732	0,902400
11	1,534060	1,354609	2,455869	1,479987	2,531258	1,495044	2,531258	1,479987	2,455869	1,354609
12	1,536283	1,356591	2,462959	1,483078	2,538110	1,500753	2,546393	1,495871	2,519403	1,451580
13	1,538015	1,358299	2,466190	1,485355	2,542948	1,504555	2,555682	1,504555	2,542948	1,485355
14	1,539391	1,359568	2,468705	1,487085	2,546508	1,507230	2,561838	1,509856	2,557383	1,500821
15	1,540502	1,360587	2,470700	1,488434	2,549212	1,509194	2,566155	1,513354	2,566155	1,509194
16	1,541412	1,361417	2,472310	1,489506	2,551321	1,510684	2,569316	1,515798	2,571920	1,514263
17	1,542167	1,362103	2,473631	1,490376	2,553000	1,511845	2,571709	1,517583	2,575937	1,517583
18	1,542799	1,362676	2,474727	1,491090	2,554362	1,512770	2,573571	1,518931	2,578860	1,519888
19	1,543335	1,363160	2,475649	1,491685	2,555484	1,513520	2,575053	1,519979	2,581065	1,521562
20	1,543793	1,363573	2,476430	1,492187	2,556419	1,514137	2,576254	1,520811	2,582774	1,522821

$b_п = 0,3$ *дБ*; ($|Г|_{макс} = 0,26$); $1/r = 1,696744$

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1,534060	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	2,301956	0,905429	—	—	—	—	—	—	—	—
13	2,466190	1,358299	1,538015	—	—	—	—	—	—	—
14	2,523202	1,454966	2,306838	0,907261	—	—	—	—	—	—
15	2,549212	1,488434	2,470700	1,360587	1,540502	—	—	—	—	—
16	2,563244	1,503657	2,527310	1,457091	2,309975	0,908451	—	—	—	—
17	2,571709	1,511845	2,553000	1,490376	2,473631	1,362103	1,542167	—	—	—
18	2,577237	1,516770	2,566783	1,505450	2,529998	1,458516	2,312111	0,909269	—	—
19	2,581065	1,519979	2,575053	1,513520	2,555484	1,491685	2,475649	1,363160	1,543335	—
20	2,583838	1,522194	2,580426	1,518352	2,669104	1,509662	2,531859	1,459519	2,313633	0,909854

Продолжение табл. 2

$b_п=0,4\ дБ$; $(|Г|_{макс}=0,3)$; $1/r=1,843511$

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	1,298854	0,704554	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,490880	1,118002	1,490880	—	—	—	—	—	—	—
4	1,564990	1,222520	2,253730	0,848917	—	—	—	—	—	—
5	1,600610	1,263209	2,431458	1,263209	1,600610	—	—	—	—	—
6	1,620321	1,283290	2,498586	1,355340	2,365760	0,878931	—	—	—	—
7	1,632332	1,294720	2,531374	1,389206	2,531374	1,294720	1,632332	—	—	—
8	1,640178	1,301867	2,550013	1,405489	2,591035	1,383237	2,400006	0,889702	—	—
9	1,645581	1,306644	2,561706	1,414666	2,619316	1,414666	2,561706	1,306644	1,645581	—
10	1,649457	1,310000	2,569566	1,420399	2,635102	1,429393	2,618523	1,393843	2,415001	0,894735
11	1,652330	1,312451	2,575124	1,424248	2,644903	1,437541	2,644903	1,424248	2,575124	1,312451
12	1,654520	1,314297	2,579209	1,426967	2,651455	1,442567	2,659389	1,438263	2,630636	1,399074
13	1,656227	1,315722	2,582306	1,428974	2,656080	1,445911	2,668270	1,445911	2,656080	1,428974
14	1,657582	1,316846	2,584713	1,430497	2,659481	1,448264	2,674153	1,450576	2,669890	1,442617
15	1,658676	1,317749	2,586623	1,431683	2,662064	1,449991	2,678276	1,453652	2,678276	1,449991
16	1,659573	1,318484	2,588166	1,432627	2,664079	1,451300	2,681295	1,455800	2,683785	1,454449
17	1,660315	1,319092	2,589430	1,433392	2,665683	1,452321	2,683579	1,457369	2,687619	1,457369
18	1,660939	1,319599	2,590480	1,434021	2,666984	1,453133	2,685357	1,458553	2,690410	1,459394
19	1,661466	1,320028	2,591362	1,434544	2,668055	1,453792	2,686771	1,459473	2,692514	1,460865
20	1,661916	1,320394	2,592109	1,434985	2,668948	1,454334	2,687917	1,460204	2,694145	1,461971

$b_п=0,4\ дБ$; $(|Г|_{макс}=0,3)$; $1/r=1,843511$

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1,652330	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	2,422921	0,897482	—	—	—	—	—	—	—	—
13	2,582306	1,315722	1,656227	—	—	—	—	—	—	—
14	2,637137	1,402059	2,427620	0,899143	—	—	—	—	—	—
15	2,662064	1,431683	2,586623	1,317749	1,658676	—	—	—	—	—
16	2,675489	1,445111	2,641065	1,403932	2,430640	0,900222	—	—	—	—
17	2,683579	1,452321	2,665683	1,433392	2,589430	1,319092	1,660315	—	—	—
18	2,688859	1,456653	2,678868	1,446887	2,643634	1,405188	2,432697	0,900963	—	—
19	2,692514	1,459473	2,686771	1,453792	2,668055	1,434544	2,591362	1,320028	1,661466	—
20	2,695161	1,461420	2,691903	1,458042	2,681083	1,447752	2,645412	1,406070	2,434160	0,901493

Продолжение табл. 2

$b_п = 0,5\ дБ$; $(|\Gamma|_{макс} = 0,33)$; $1/r = 1,984126$

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	1,402945	0,707084	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,596332	1,096680	1,596332	—	—	—	—	—	—	—
4	1,670357	1,192549	2,366170	0,841859	—	—	—	—	—	—
5	1,705820	1,229610	2,540881	1,229510	1,705821	—	—	—	—	—
6	1,725415	1,247851	2,606419	1,313635	2,475894	0,869608	—	—	—	—
7	1,737342	1,258218	2,638345	1,344312	2,638345	1,258218	1,737342	—	—	—
8	1,745130	1,264696	2,656470	1,359023	2,696474	1,338861	2,509318	0,879545	—	—
9	1,750490	1,269024	2,667833	1,367303	2,723956	1,367303	2,667833	1,269024	1,750490	—
10	1,754335	1,272064	2,675467	1,372472	2,739276	1,380595	2,723159	1,348435	2,523937	0,884184
11	1,757185	1,274283	2,680863	1,375940	2,748780	1,387940	2,748780	1,375940	2,680863	1,274283
12	1,759356	1,275954	2,684828	1,378393	2,755132	1,392427	2,762831	1,388586	2,734906	1,353153
13	1,761048	1,277244	2,687834	1,380198	2,759613	1,395478	2,771440	1,395478	2,759613	1,380198
14	1,762392	1,278261	2,690170	1,381559	2,762909	1,397596	2,777140	1,399678	2,773008	1,392506
15	1,763477	1,279078	2,692024	1,382638	2,765412	1,399149	2,781134	1,402447	2,781134	1,399149
16	1,764365	1,279744	2,693521	1,383488	2,767363	1,400328	2,784056	1,404380	2,786469	1,403154
17	1,765100	1,280294	2,694748	1,384177	2,768916	1,401246	2,786268	1,405790	2,790182	1,405790
18	1,765718	1,280753	2,695766	1,384743	2,770176	1,401977	2,787989	1,406856	2,792884	1,407614
19	1,766241	1,281141	2,696621	1,385214	2,771213	1,402570	2,789358	1,407684	2,794920	1,408937
20	1,766688	1,281471	2,697347	1,385611	2,772078	1,403058	2,790468	1,408341	2,796499	1,409931

$b_п = 0,5\ дБ$; $(|\Gamma|_{макс} = 0,33)$; $1/r = 1,984126$

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1,757185	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	2,531654	0,886715	—	—	—	—	—	—	—	—
13	2,687834	1,277244	1,761048	—	—	—	—	—	—	—
14	2,741209	1,355845	2,536233	0,888244	—	—	—	—	—	—
15	2,765412	1,382638	2,692024	1,279078	1,763477	—	—	—	—	—
16	2,778429	1,394750	2,745016	1,357534	2,539174	0,889238	—	—	—	—
17	2,786268	1,401246	2,768916	1,384177	2,694748	1,280294	1,765100	—	—	—
18	2,791382	1,406146	2,781700	1,396169	2,747505	1,359666	2,541176	0,889920	—	—
19	2,794920	1,407684	2,789358	1,402570	2,771213	1,385214	2,696621	1,281141	1,766241	—
20	2,797484	1,409435	2,794329	1,406395	2,783845	1,397127	2,749228	1,359463	2,542602	0,890409

Продолжение табл. 2

$b_п=0,6$ *дБ*; $(|\Gamma|_{макс}=0,36)$; $1/r=2,121264$

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	1,497506	0,705950	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,692372	1,075173	1,692372	—	—	—	—	—	—	—
4	1,766489	1,164101	2,469363	0,832753	—	—	—	—	—	—
5	1,801907	1,198290	2,642050	1,198290	1,801907	—	—	—	—	—
6	1,821451	1,219082	2,706484	1,275884	2,577508	0,858663	—	—	—	—
7	1,833340	1,224616	2,737807	1,304063	2,737807	1,224616	1,833340	—	—	—
8	1,841099	1,230569	2,755571	1,317548	2,794866	1,299024	2,610360	0,867925	—	—
9	1,846438	1,234545	2,766702	1,325131	2,821786	1,325131	2,766702	1,234545	1,846438	—
10	1,850266	1,237337	2,774177	1,329862	2,836778	1,337306	2,820937	1,307795	2,624717	0,872246
11	1,853104	1,239375	2,779459	1,333035	2,846074	1,344027	2,846074	1,333035	2,779459	1,239375
12	1,855266	1,240909	2,783341	1,335279	2,852284	1,348168	2,859818	1,344616	2,832476	1,312115
13	1,856950	1,242094	2,786283	1,336929	2,856664	1,350921	2,868236	1,350921	2,856664	1,336929
14	1,858287	1,243028	2,788569	1,338184	2,859885	1,352857	2,873805	1,354762	2,869764	1,348199
15	1,859367	1,243777	2,790383	1,339160	2,862331	1,354277	2,877708	1,357292	2,877708	1,354277
16	1,860251	1,244388	2,791348	1,339938	2,864237	1,355354	2,880563	1,359059	2,882921	1,357947
17	1,860984	1,244893	2,793048	1,340568	2,865755	1,356193	2,882724	1,360348	2,886549	1,360348
18	1,861599	1,245314	2,794045	1,341085	2,866987	1,356860	2,884405	1,361321	2,889189	1,362013
19	1,862119	1,245671	2,794881	1,341516	2,867999	1,357402	2,885742	1,362078	2,891177	1,363222
20	1,862563	1,245974	2,795591	1,341879	2,868844	1,357848	2,886825	1,362678	2,892719	1,364131

$b_п=0,6$ *дБ*; $(|\Gamma|_{макс}=0,36)$; $1/r=2,121264$

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1,853104	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	2,632294	0,874603	—	—	—	—	—	—	—	—
13	2,786283	1,242094	1,856950	—	—	—	—	—	—	—
14	2,833639	1,314580	2,636787	0,876027	—	—	—	—	—	—
15	2,862331	1,339160	2,790383	1,243777	1,859367	—	—	—	—	—
16	2,875061	1,350251	2,842360	1,316125	2,639674	0,876953	—	—	—	—
17	2,882724	1,356193	2,865755	1,340568	2,793048	1,244893	1,860984	—	—	—
18	2,887721	1,359758	2,878258	1,351547	2,844794	1,317161	2,641639	0,877588	—	—
19	2,891177	1,362078	2,885742	1,357402	2,867999	1,341516	2,794881	1,245671	1,862119	—
20	2,893679	1,363678	2,890597	1,360900	2,880351	1,352423	2,846477	1,317890	2,643038	0,878043

Продолжение табл. 2

$b_п = 0{,}7$ *дБ*; ($|Г|_{макс} = 0{,}39$); $1/r = 2{,}256506$

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	1,585248	0,702523	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,781692	1,053999	1,781692	—	—	—	—	—	—	—
4	1,856024	1,137169	2,566029	0,822521	—	—	—	—	—	—
5	1,891473	1,169004	2,737369	1,169004	1,891473	—	—	—	—	—
6	1,911014	1,184612	2,801025	1,241311	2,673083	0,846891	—	—	—	—
7	1,922894	1,193466	2,831917	1,267458	2,831917	1,193466	1,922894	—	—	—
8	1,930645	1,198993	2,849423	1,279950	2,888214	1,262759	2,705533	0,855590	—	—
9	1,935977	1,202683	2,860386	1,286968	2,914730	1,286968	2,860386	1,902683	1,935977	—
10	1,939800	1,205273	2,867746	1,291345	2,929485	1,298240	2,913927	1,270880	2,719704	0,859647
11	1,942634	1,207163	2,872947	1,294280	2,938630	1,304458	2,938630	1,294280	2,872947	1,207163
12	1,944791	1,208586	2,876769	1,296355	2,944738	1,308286	2,952153	1,304999	2,925231	1,274878
13	1,946473	1,209685	2,879664	1,297881	2,949045	1,310831	2,960431	1,310831	2,949045	1,297881
14	1,947808	1,210651	2,881915	1,299040	2,952212	1,312619	2,966907	1,314380	2,961933	1,308312
15	1,948885	1,211246	2,883700	1,299944	2,954616	1,313932	2,969743	1,316719	2,969743	1,313932
16	1,949767	1,211813	2,885141	1,300663	2,956490	1,314927	2,972549	1,318352	2,974868	1,317324
17	1,950499	1,212281	2,889322	1,301244	2,957983	1,315702	2,974674	1,319543	2,978434	1,319543
18	1,951112	1,212672	2,887303	1,301723	2,959192	1,316319	2,977632	1,320442	2,981028	1,321082
19	1,951631	1,213002	2,888126	1,302121	2,960188	1,316819	2,977639	1,321141	2,982982	1,322199
20	1,952075	1,213284	2,888825	1,302456	2,961019	1,317231	2,978704	1,321695	2,984498	1,323038

$b_п = 0{,}7$ *дБ*; ($|Г|_{макс} = 0{,}39$); $1/r = 2{,}256506$

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	1,942634	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	2,727180	0,861859	—	—	—	—	—	—	—	—
13	2,879664	1,209685	1,946473	—	—	—	—	—	—	—
14	2,931292	1,277158	2,731614	0,863195	—	—	—	—	—	—
15	2,954616	1,299944	2,883700	0,211246	1,948885	—	—	—	—	—
16	2,967139	1,310208	2,934952	1,278588	2,734462	0,864064	—	—	—	—
17	2,974674	1,315702	2,957983	1,301244	2,889322	1,212281	1,950499	—	—	—
18	2,979585	1,318998	2,970280	1,311405	2,937344	1,279546	2,736400	0,864660	—	—
19	2,982982	1,321141	2,977639	1,316819	2,960188	1,302121	2,888126	1,213002	1,951631	—
20	2,985442	1,322619	2,982413	1,320052	2,972339	1,312214	2,938999	1,280221	2,737780	0,865086

Продолжение табл. 2

$b_п = 0,8$ ∂Б; $(|Г|_{макс} = 0,41)$; $1/r = 2,390897$

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	1,667870	0,697592	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,865980	1,033380	1,865980	—	—	—	—	—	—	—
4	1,940620	1,111659	2,657859	0,811970	—	—	—	—	—	—
5	1,976156	1,141510	2,828343	1,141510	1,976156	—	—	—	—	—
6	1,995728	1,156125	2,891452	1,209359	2,764174	0,834719	—	—	—	—
7	2,007621	1,164410	2,922036	1,233807	2,922036	1,164410	2,007621	—	—	—
8	2,015379	1,169579	2,939355	1,245470	2,977789	1,229395	2,796341	0,842938	—	—
9	2,020714	1,173029	2,950198	1,252019	3,004015	1,252019	2,950198	1,173029	2,020714	—
10	2,024539	1,175451	2,957476	1,256102	3,018598	1,262539	3,003208	1,239974	2,810381	0,846769
11	2,027374	1,177219	2,962617	1,258839	3,027632	1,268337	3,027632	1,258839	2,962617	1,177219
12	2,029533	1,178549	2,966394	1,260773	3,033665	1,271906	3,040994	1,268840	3,014376	1,240704
13	2,031214	1,179576	2,969256	1,262196	3,037918	1,274278	3,049169	1,274278	3,037918	1,262196
14	2,032549	1,180385	2,971480	1,263277	3,041045	1,275945	3,054577	1,277587	3,050651	1,271927
15	2,033627	1,181035	2,973245	1,264119	3,043420	1,277168	3,058364	1,279767	3,058364	1,277168
16	2,034510	1,181564	2,974669	1,264788	3,045270	1,278095	3,061135	1,281288	3,063425	1,280330
17	2,035241	1,182002	2,975837	1,265331	3,046744	1,278817	3,063231	1,282397	3,066945	1,282397
18	2,035855	1,182367	2,976806	1,265777	3,047938	1,279392	3,064862	1,283235	3,069505	1,283831
19	2,036374	1,182676	2,977619	1,266148	3,048921	1,279858	3,066159	1,283886	3,071434	1,284871
20	2,036817	1,182939	2,977831	1,266460	3,049741	1,280241	3,067210	1,284402	3,072930	1,285653

$b_п = 0,8$ ∂Б; $(|Г|_{макс} = 0,41)$; $1/r = 2,390897$

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	2,027374	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	2,817786	0,848858	—	—	—	—	—	—	—	—
13	2,969256	1,179576	2,031214	—	—	—	—	—	—	—
14	3,020362	1,242832	2,822177	0,850119	—	—	—	—	—	—
15	3,043420	1,264119	2,973245	1,181035	2,033627	—	—	—	—	—
16	3,055791	1,273694	3,023977	1,244165	2,824997	0,850939	—	—	—	—
17	3,063231	1,278817	3,046744	1,265331	2,975837	1,182002	2,035241	—	—	—
18	3,068081	1,281889	3,058892	1,274810	3,026339	1,245059	2,826916	0,851501	—	—
19	3,071434	1,283886	3,066159	1,279858	3,048921	1,266148	2,977619	1,182676	2,036374	—
20	3,073862	1,285263	3,070871	1,282870	3,060924	1,275564	3,027974	1,245688	2,828283	0,851904

Продолжение табл. 2

$b_п = 0{,}9$ $дБ$; ($|\Gamma|_{макс} = 0{,}43$); $1/r = 2{,}524621$

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	1,746520	0,691645	—	—	—	—	—	—	—	—
3	1,946371	1,013399	1,946371	—	—	—	—	—	—	—
4	2,021391	1,087447	2,745985	0,800498	—	—	—	—	—	—
5	2,057057	1,115596	2,915984	1,115596	2,057057	—	—	—	—	—
6	2,076687	1,129361	2,978720	1,179613	2,851824	0,822396	—	—	—	—
7	2,088611	1,137159	3,009087	1,202609	3,009087	1,137159	2,088611	—	—	—
8	2,096386	1,142023	3,026274	1,213568	3,064461	1,198445	2,883799	0,830196	—	—
9	2,101733	1,145269	3,037030	1,219717	3,090477	1,219717	3,037030	1,145269	2,101733	—
10	2,105565	1,147547	3,044248	1,223549	3,104935	1,229596	3,089666	1,205563	2,897747	0,833831
11	2,108405	1,149209	3,049347	1,226118	3,113890	1,235039	3,113890	1,226118	3,049347	1,149209
12	2,110568	1,150460	3,053092	1,227933	3,119868	1,238388	3,127135	1,235510	3,100735	1,209066
13	2,112253	1,151426	3,055930	1,229268	3,124083	1,240613	3,135236	1,240613	3,124083	1,229268
14	2,113590	1,152187	3,058135	1,230282	3,127181	1,242177	3,140593	1,243717	3,136703	1,238406
15	2,114570	1,152798	3,059884	1,231072	3,129533	1,243324	3,144345	1,245762	3,144345	1,243324
16	2,115554	1,153296	3,061297	1,231701	3,131366	1,244193	3,147090	1,247188	3,149359	1,246290
17	2,116287	1,153707	3,062454	1,232209	3,132826	1,244870	3,149166	1,248229	3,152845	1,248229
18	2,116901	1,154051	3,063414	1,232628	3,134009	1,245409	3,150781	1,249019	3,155381	1,249574
19	2,117421	1,154341	3,064221	1,232976	3,134983	1,245846	3,152065	1,249624	3,157292	1,250549
20	2,117866	1,154588	3,064905	1,233269	3,135795	1,246206	3,153106	1,250109	3,158772	1,251282

$b_п = 0{,}9$ $дБ$; ($|\Gamma|_{макс} = 0{,}43$); $1/r = 2{,}524621$

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	2,108405	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	2,905103	0,835813	—	—	—	—	—	—	—	—
13	3,055930	1,151426	2,112253	—	—	—	—	—	—	—
14	3,106668	1,211068	2,909464	0,837009	—	—	—	—	—	—
15	3,129533	1,231072	3,059884	1,152798	2,114570	—	—	—	—	—
16	3,141794	1,240063	3,110249	1,212315	2,912264	0,837787	—	—	—	—
17	3,149166	1,244870	3,132826	1,232209	3,062454	1,153707	2,116287	—	—	—
18	3,153970	1,247752	3,144865	1,241110	3,112590	1,213154	2,914170	0,838320	—	—
19	3,157292	1,249624	3,152065	1,245846	3,134983	1,232976	3,064221	1,154341	2,117421	—
20	3,159696	1,250917	3,156734	1,248673	3,146878	1,241817	3,114210	1,213744	2,915527	0,838702

Продолжение табл. 2

$b_п = 1,0\ дБ$; $(|Г|_{макс} = 0,45)$; $1/r = 2,659864$

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	1,822010	0,685002	—	—	—	—	—	—	—	—
3	2,023761	0,994083	2,023761	—	—	—	—	—	—	—
4	2,099130	1,064417	2,831204	0,789187	—	—	—	—	—	—
5	2,134960	1,091082	3,001009	1,091082	2,134960	—	—	—	—	—
6	2,154669	1,104108	3,063507	1,151754	2,936774	0,810067	—	—	—	—
7	2,166636	1,111484	3,093728	1,173491	3,093728	1,111484	2,166636	—	—	—
8	2,174438	1,116082	3,110823	1,183839	3,148849	1,169543	2,968624	0,817500	—	—
9	2,179802	1,119151	3,121519	1,189643	3,174720	1,189643	3,121519	1,119151	2,179802	—
10	2,183647	1,121304	3,128696	1,193259	3,189090	1,198968	3,173904	1,176263	2,982513	0,820962
11	2,186496	1,122874	3,133765	1,195682	3,197988	1,204103	3,197988	1,195682	3,133765	1,122874
12	2,188665	1,124057	3,137488	1,197394	3,203927	1,207262	3,211150	1,204547	3,184903	1,179568
13	2,190355	1,124969	3,140309	1,198654	3,208114	1,209360	3,219198	1,209360	3,208114	1,198654
14	2,191898	1,125689	3,142501	1,199610	3,211192	1,210835	3,224520	1,212289	3,220654	1,207278
15	2,192780	1,126266	3,144240	1,200355	3,213528	1,211918	3,228247	1,214216	3,228247	1,211918
16	2,193666	1,126737	3,145643	1,200948	3,215349	1,212736	3,230972	1,215561	3,233226	1,214714
17	2,194402	1,127155	3,146794	1,201428	3,216799	1,213374	3,233034	1,216542	3,236689	1,216542
18	2,195017	1,127450	3,147748	1,201822	3,217973	1,213883	3,234637	1,217283	3,239206	1,217810
19	2,195539	1,127724	3,148549	1,202151	3,218940	1,214295	3,235912	1,217858	3,241103	1,218730
20	2,195984	1,127958	3,149230	1,202427	3,219747	1,214534	3,236946	1,218315	3,242574	1,219421

$b_п = 1,0\ дБ$; $(|Г|_{макс} = 0,45)$; $1/r = 2,659864$

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	2,186496	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	2,989835	0,822848	—	—	—	—	—	—	—	—
13	3,140309	1,124969	2,190355	—	—	—	—	—	—	—
14	3,190797	1,181453	2,994177	0,823988	—	—	—	—	—	—
15	3,213528	1,200355	3,144240	1,126266	2,192780	—	—	—	—	—
16	3,225711	1,208840	3,194356	1,182634	2,996964	0,824728	—	—	—	—
17	3,233034	1,213374	3,216799	1,201428	3,146794	1,127155	2,194402	—	—	—
18	3,237804	1,216092	3,228761	1,209827	3,196681	1,183425	2,998861	0,825236	—	—
19	3,241103	1,217858	3,235912	1,214295	3,218940	1,202151	3,148549	1,127724	2,195539	—
20	3,243491	1,219076	3,240549	1,216950	3,230759	1,210494	3,198290	1,183982	3,000212	0,825599

Продолжение табл. 2

$b_п = 1,5$ $дБ$; $(|\Gamma|_{макс} = 0,54)$; $1/r = 3,352037$

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	2,168882	0,647036	—	—	—	—	—	—	—	—
3	2,380420	0,906861	2,380420	—	—	—	—	—	—	—
4	2,458693	0,963625	3,230093	0,733495	—	—	—	—	—	—
5	2,495698	0,984938	3,401779	0,984938	2,495698	—	—	—	—	—
6	2,516008	0,995311	3,464376	1,033518	3,336304	0,750593	—	—	—	—
7	2,528327	1,001173	3,494536	1,050761	3,494536	1,001173	2,528327	—	—	—
8	2,536351	1,004825	3,511567	1,058940	3,549592	1,047596	3,368197	0,756662	—	—
9	2,541866	1,007260	3,522213	1,063519	3,575340	1,063519	3,522213	1,007260	2,541866	—
10	2,545817	1,008968	3,529350	1,066370	3,589619	1,070880	3,574498	1,052900	3,382085	0,759486
11	2,548743	1,010214	3,534390	1,068279	3,598450	1,074928	3,598450	1,068279	3,534390	1,010214
12	2,550970	1,011151	3,538091	1,069627	3,604343	1,077414	3,611519	1,075274	3,585416	1,055509
13	2,552708	1,011874	3,540895	1,070619	3,608495	1,079065	3,619502	1,079065	3,608495	1,070619
14	2,554085	1,012445	3,543070	1,071372	3,611545	1,080225	3,624777	1,081370	3,620941	1,077422
15	2,555197	1,012900	3,544799	1,071958	3,613860	1,081076	3,628470	1,082886	3,628470	1,081076
16	2,556107	1,013275	3,546193	1,072424	3,615665	1,081720	3,631169	1,083944	3,633404	1,083277
17	2,556862	1,013584	3,547336	1,072800	3,617101	1,082222	3,633212	1,084715	3,636834	1,084715
18	2,557495	1,013840	3,548285	1,073112	3,618266	1,082621	3,634801	1,085296	3,639329	1,085715
19	2,558030	1,014058	3,549080	1,073371	3,619224	1,082945	3,636064	1,085749	3,641208	1,086434
20	2,558488	1,014243	3,549757	1,073588	3,620023	1,083212	3,637087	1,086107	3,642664	1,086977

$b_п = 1,5$ $дБ$; $(|\Gamma|_{макс} = 0,54)$; $1/r = 3,352037$

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	2,548743	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	3,389400	0,761024	—	—	—	—	—	—	—	—
13	3,540895	1,011874	2,552708	—	—	—	—	—	—	—
14	3,591263	1,056995	3,393738	0,761952	—	—	—	—	—	—
15	3,613860	1,071958	3,544799	1,012900	2,555197	—	—	—	—	—
16	3,625952	1,078651	3,594792	1,057926	3,396521	0,762555	—	—	—	—
17	3,633212	1,082222	3,617101	1,072800	3,547336	1,013584	2,556862	—	—	—
18	3,637940	1,084360	3,628973	1,079427	3,597098	1,058550	3,398417	0,762969	—	—
19	3,641208	1,085749	3,636064	1,082945	3,619224	1,073371	3,549080	1,014058	2,558030	—
20	3,643572	1,086706	3,640067	1,085042	3,630952	1,079951	3,598694	1,058989	3,399765	0,763265

Продолжение табл. 2

$b_п$=2,0 *дБ*; ($|\Gamma|_{макс}$=0,61); 1/r=4,095708

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	2,488259	0,607527	—	—	—	—	—	—	—	—
3	2,710815	0,836380	2,710815	—	—	—	—	—	—	—
4	2,792592	0,880548	3,606474	0,681832	—	—	—	—	—	—
5	2,831149	0,898429	3,782880	0,898429	2,831149	—	—	—	—	—
6	2,852284	0,907111	3,846821	0,939231	3,715270	0,696406	—	—	—	—
7	2,865093	0,912013	3,877559	0,953629	3,877559	0,912013	2,865093	—	—	—
8	2,873433	0,915065	3,894899	0,960443	3,933700	0,950969	3,747844	0,701570	—	—
9	2,879162	0,917099	3,905729	0,964254	3,959899	0,964254	3,905729	0,917099	2,879162	—
10	2,883266	0,918525	3,912990	0,966625	3,974411	0,970383	3,959020	0,955086	3,762015	0,703971
11	2,886306	0,919565	3,918114	0,968213	3,983383	0,973748	3,983383	0,968213	3,918114	0,919565
12	2,888620	0,920347	3,921877	0,969333	3,989366	0,975815	3,996659	0,974034	3,970113	0,957556
13	2,890423	0,920951	3,924727	0,970157	3,993581	0,977186	4,004765	0,977186	3,993581	0,970157
14	2,891853	0,921427	3,926940	0,970783	3,996677	0,978150	4,010119	0,979101	4,006224	0,975819
15	2,893007	0,921809	3,928696	0,971270	3,999027	0,978856	4,013867	0,980361	4,013867	0,978856
16	2,893953	0,922120	3,930113	0,971658	4,000859	0,979391	4,016606	0,981239	4,018874	0,980685
17	2,894736	0,922377	3,931274	0,971971	4,002316	0,979808	4,018678	0,981879	4,022355	0,981879
18	2,895393	0,922592	3,932238	0,972229	4,003497	0,980140	4,020289	0,982362	4,024885	0,982706
19	2,895949	0,922773	3,933046	0,972444	4,004469	0,980408	4,021570	0,982737	4,026790	0,983306
20	2,896424	0,922927	3,933764	0,972625	4,005280	0,980630	4,022608	0,983035	4,028267	0,983757

$b_п$=2,0 *дБ*; ($|\Gamma|_{макс}$=0,61); 1/r=4,095708

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	2,886306	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	3,769480	0,705278	—	—	—	—	—	—	—	—
13	3,924727	0,920951	2,890423	—	—	—	—	—	—	—
14	3,976051	0,958792	3,773901	0,706067	—	—	—	—	—	—
15	3,999027	0,971270	3,928696	0,921809	2,893007	—	—	—	—	—
16	4,011308	0,976840	3,979634	0,959567	3,776740	0,706579	—	—	—	—
17	4,018678	0,979808	4,002316	0,971971	3,931274	0,923377	2,894736	—	—	—
18	4,023475	0,981584	4,014373	0,977484	3,981974	0,960086	3,778672	0,706931	—	—
19	4,026790	0,982737	4,021570	0,980408	4,004469	0,972444	3,933046	0,922773	2,895949	—
20	4,029189	0,983532	4,026230	0,982150	4,016380	0,977919	3,983594	0,960451	3,780047	0,707183

Продолжение табл. 2

$b_п = 2,5$ $дБ$; $(|\Gamma|_{макт} = 0,66)$; $1/r = 4,909855$

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	2,796378	0,569543	—	—	—	—	—	—	—	—
3	3,030935	0,768305	3,030935	—	—	—	—	—	—	—
4	3,116706	0,809833	3,976169	0,634784	—	—	—	—	—	—
5	3,157071	0,825267	4,159002	0,825267	3,157071	—	—	—	—	—
6	3,179196	0,832750	4,225000	0,860512	4,088689	0,647507	—	—	—	—
7	3,192567	0,836971	4,256681	0,872899	4,256681	0,836971	3,192567	—	—	—
8	3,201282	0,839597	4,274537	0,878753	4,314562	0,870601	4,122310	0,652010	—	—
9	3,207269	0,841347	4,285687	0,882025	4,341530	0,882025	4,285687	0,841347	3,207269	—
10	3,211557	0,842574	4,293159	0,884059	4,356459	0,887287	4,340613	0,874394	4,136928	0,654102
11	3,214732	0,843469	4,298432	0,885421	4,365684	0,890174	4,365684	0,885421	4,298432	0,843469
12	3,217149	0,844142	4,302303	0,886382	4,371834	0,891946	4,379337	0,890418	4,352018	0,876256
13	3,219030	0,844662	4,305234	0,887089	4,376165	0,893122	4,387668	0,893122	4,376165	0,887089
14	3,220525	0,845071	4,307512	0,887625	4,379348	0,893948	4,393171	0,894764	4,389166	0,891948
15	3,221730	0,845399	4,309316	0,888043	4,381762	0,894553	4,397020	0,895844	4,397020	0,894553
16	3,222717	0,845667	4,310774	0,888376	4,383643	0,895012	4,399835	0,896596	4,402166	0,896121
17	3,223540	0,845888	4,311969	0,888644	4,385142	0,895369	4,401964	0,897145	4,405743	0,897145
18	3,224223	0,846072	4,312962	0,888865	4,386357	0,895653	4,403620	0,897558	4,408343	0,897853
19	3,224802	0,846228	4,313793	0,889049	4,387355	0,895884	4,404935	0,897880	4,410300	0,898368
20	3,225297	0,846361	4,314498	0,889205	4,388187	0,896074	4,406000	0,898135	4,411815	0,898754

$b_п = 2,5$ $дБ$; $(|\Gamma|_{макс} = 0,66)$; $1/r = 4,909855$

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	3,214732	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	4,144625	0,655241	—	—	—	—	—	—	—	—
13	4,305234	0,844662	3,219030	—	—	—	—	—	—	—
14	4,368120	0,877317	4,149185	0,655928	—	—	—	—	—	—
15	4,381762	0,888043	4,309316	0,845399	3,221730	—	—	—	—	—
16	4,394389	0,892824	4,361804	0,877982	4,152110	0,656375	—	—	—	—
17	4,401964	0,895369	4,385142	0,888644	4,311969	0,845888	3,223540	—	—	—
18	4,406895	0,896892	4,397539	0,893375	4,364210	0,878427	4,154104	0,656681	—	—
19	4,410300	0,897880	4,404935	0,895884	4,387355	0,889049	4,313793	0,846228	3,224802	—
20	4,412762	0,898561	4,409723	0,897377	4,399599	0,893749	4,365874	0,878741	4,155519	0,656900

Продолжение табл. 2

$b_п = 3{,}0$ ∂Б; $(|\Gamma|_{макс} = 0{,}71)$; $1/r = 5{,}809495$

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	3,101446	0,533859	—	—	—	—	—	—	—	—
3	3,348931	0,711667	3,348931	—	—	—	—	—	—	—
4	3,439108	0,748307	4,347275	0,591981	—	—	—	—	—	—
5	3,481488	0,761883	4,537781	0,761883	3,481488	—	—	—	—	—
6	3,504682	0,768456	4,606344	0,792901	4,464334	0,603269	—	—	—	—
7	3,518726	0,772163	4,639217	0,803770	4,639217	0,772163	3,518726	—	—	—
8	3,527865	0,774468	4,657736	0,808900	4,699294	0,801747	4,499260	0,607259	—	—
9	3,534140	0,776004	4,669295	0,811766	4,727254	0,811766	4,669295	0,776004	3,534140	—
10	3,538637	0,777081	4,667040	0,813548	4,742724	0,816376	4,726293	0,805070	4,514439	0,609113
11	3,541964	0,777866	4,682505	0,814740	4,752279	0,818904	4,752279	0,814740	4,682505	0,777866
12	3,544499	0,778456	4,686518	0,815581	4,758649	0,820455	4,766424	0,819117	4,738108	0,806701
13	3,546470	0,778912	4,689555	0,816200	4,763134	0,821485	4,775052	0,821485	4,763134	0,816200
14	3,548038	0,779271	4,691916	0,816669	4,766432	0,822207	4,780750	0,822922	4,776600	0,820459
15	3,549300	0,779559	4,693787	0,817035	4,768931	0,822737	4,784738	0,823866	4,784738	0,822737
16	3,550334	0,779794	4,695297	0,817326	4,770879	0,823139	4,787650	0,824525	4,790065	0,824109
17	3,551192	0,779988	4,696534	0,817562	4,772429	0,823451	4,789854	0,825005	4,793767	0,825005
18	3,551909	0,780150	4,697559	0,817755	4,773684	0,823700	4,791565	0,825368	4,796456	0,825626
19	3,552519	0,780286	4,698424	0,817916	4,774720	0,823901	4,792930	0,825648	4,798484	0,826075
20	3,553039	0,780403	4,699155	0,818052	4,775583	0,824067	4,794034	0,825872	4,800054	0,826413

$b_п = 3{,}0$ ∂Б; $(|\Gamma|_{макс} = 0{,}71)$; $1/r = 5{,}809495$

n	g_{11}	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{15}	g_{16}	g_{17}	g_{18}	g_{19}	g_{20}
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	3,541964	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	4,522429	0,610122	—	—	—	—	—	—	—	—
13	4,689555	0,778912	3,546470	—	—	—	—	—	—	—
14	4,744430	0,807630	4,527163	0,610731	—	—	—	—	—	—
15	4,768931	0,817035	4,693787	0,779559	3,549300	—	—	—	—	—
16	4,782011	0,821222	4,748243	0,808212	4,530199	0,611126	—	—	—	—
17	4,789854	0,823451	4,772429	0,817562	4,696534	0,779988	3,551192	—	—	—
18	4,794956	0,824784	4,785268	0,821709	4,750733	0,808603	4,532264	0,611398	—	—
19	4,798484	0,825648	4,792930	0,823901	4,774720	0,817916	4,698424	0,780286	3,552519	—
20	4,801034	0,826244	4,797889	0,825208	4,787405	0,822032	4,752459	0,808876	4,533738	0,611592

СОДЕРЖАНИЕ